

SFB 313 "Veränderungen der Umwelt: Der nördliche Nordatlantik"
(1993-1994)

Sprecherin: Prof. Dr. P. Schäfer

Stellv. Sprecher: Prof. Dr. B. Zeitzschel

Prof. Dr. G. Graf

Wiss. Sekretäre: Dr. K. Emeis (1992/1993)

Dr. D. Barthel (1993/1994)

Projektbereich A: Produktion und Sedimentbildung

Teilprojekte und Leiter

A1: *Pelagische Prozesse und Partikelfluß aus dem Pelagial in der Eisrandregion*

R. Peinert / B. Zeitzschel

A2: *Prozesse, Modelle und Bilanzen des Sedimenttransports*

J. Rumohr

A3: *Besiedlungsmuster und Stoffeintrag im Benthos*

G. Graf / M. Spindler

A4: *Stoffumsatz und diagenetische Modifikation von Produktivitäts- und Milieuindikatoren*

D. Schulz-Bull / E. Suess

Geschichte der Umwelt

Teilprojekte und Leiter

B1: *Geophysikalische Signale in Sedimenten*

R.v. Huene / J. Mienert

B2: *Chronostratigraphie und Paläoozeanographie nach Isotopen: Quantitative Rekonstruktion sowie Validierung von Modellen*

M. Sarnthein / R. Zahn

B3: *Paläontologie des Pelagials- Veränderungen im Jungquartär*

P. Schäfer / J. Thiede

B4: *Numerische Modelle von Paläoklima, Paläo-Ozeanographie, Sedimentologie und Kohlenstoffkreislauf*

R. Keir / K. Stattegger

Teilprojekt V: *Verwaltung und zentrale Dienste*

1. Einleitung

Das Europäische Nordmeer mit seinen angrenzenden Regionen ist von zentraler Bedeutung für das ozeanische Strömungssystem des Weltmeeres und für die Klimaentwicklung der nördlichen Hemisphäre (Abb. 1) (48). Es ist heute - und war eventuell auch im Glazial - ein Gebiet intensiver Erneuerung der ozeanischen Tiefenwassermassen. Die aus dem Nordatlantik in das Europäische Nordmeer gepumpten, relativ warmen Oberflächenwassermassen werden zunehmend kühler und dichter und sinken schließlich in die mittleren und tieferen Stockwerke dieses Ozeanbeckens ab. Über den Grönland-Schottland-Rücken hinweg sinken sie in die Tiefe des Nordatlantiks ab und können aufgrund ihrer spezifischen hydrographischen Eigenschaften bis in die entferntesten Teilbecken des Weltmeeres verfolgt werden, wo sie in den Auftriebszentren an die Meeresoberfläche aufsteigen und in den Atlantik und das Europäische Nordmeer zurückgeführt werden (Abb. 2). Als treibende Kraft für das ozeanische Zirkulationssystem ist das Europäische Nordmeer die "Klimaküche" Nordwest Europas. So hätte eine Unterbrechung des "atlantischen Salzförderbandes" drastische Änderungen des Klimas der nördlichen Hemisphäre zur Folge.

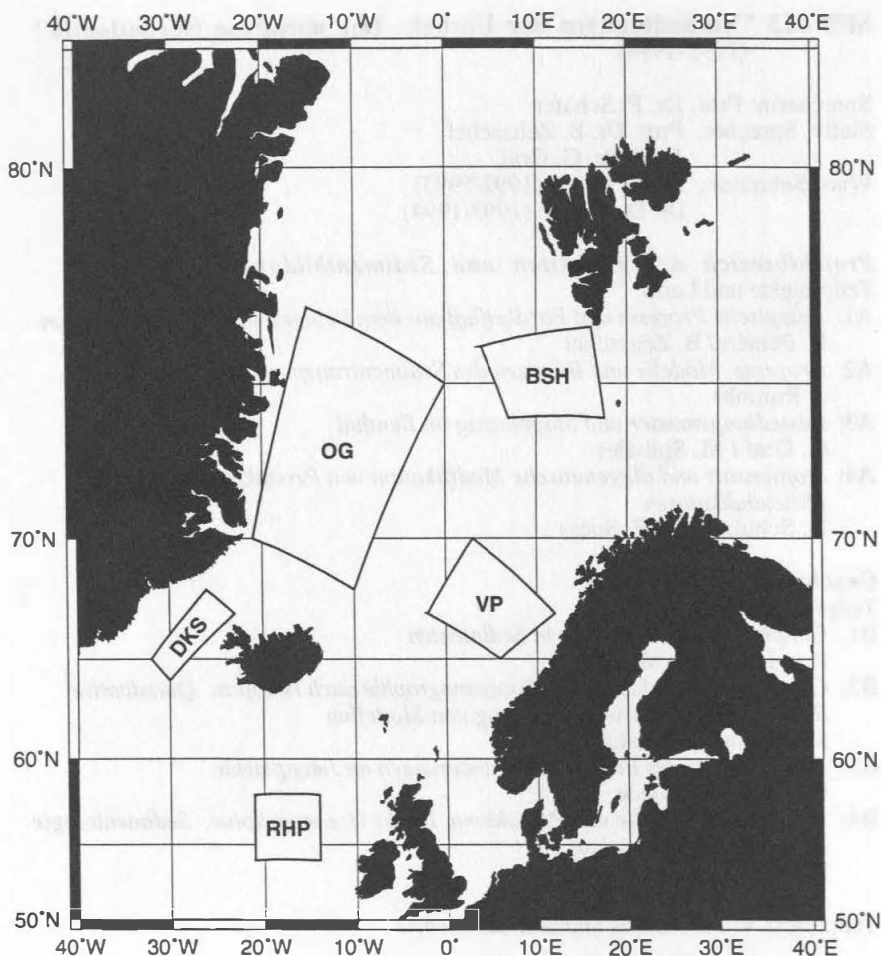


Abb. 1: Untersuchungsgebiet und Lage der Schwerpunktgebiete für die Arbeiten im SFB 313 in den Jahren 1993 bis 1994.

Wir wissen heute aus dem Vergleich von kontinentalen Eiskernen und marinen Tiefseesedimenten vor allem aus dem Nordatlantik, daß die Klimaschwankungen im Quartär innerhalb kürzester Zeitskalen, z.T. nur innerhalb von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, erfolgten. Das extrem sensibel reagierende Europäische Nordmeer ist damit nicht nur selbst eine treibende Kraft für die natürlichen Veränderungen des Klimas und der Umwelt in der jüngeren geologischen Vergangenheit, sondern dient zudem als Monitor für natürliche und anthropogen bewirkte Veränderungen in der Gegenwart. Die enge Nachbarschaft von polaren und atlantischen Oberflächenwassermassen, durch scharfe hydrographische Grenzen voneinander getrennt, machen es darüber hinaus zu einem idealen Seegebiet, um die Reaktionen der marinen Lebewelt auf Änderungen in ihrer Umwelt innerhalb biologischer (Tage bis Jahre) und geologischer Zeitskalen (Jahrhunderte bis Jahrtausende) zu studieren.

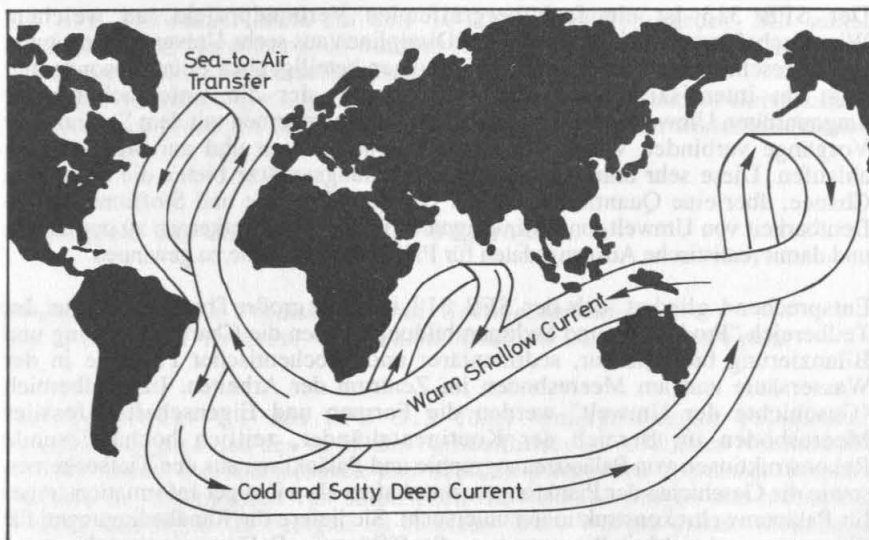


Abb. 2: Globales ozeanisches Zirkulationssystem mit dem Europäischen Nordmeer als einem wichtigen Zentrum für die Erneuerung ozeanischen Tiefenwassers.

Der Sonderforschungsbereich 313 untersucht die Umweltveränderungen in den verschiedenen Skalen von Raum und Zeit, wie sie in den heutigen Lebensgemeinschaften und in den marinen Sedimenten des Jungquartärs im Europäischen Nordmeer und des angrenzenden nördlichen Nordatlantiks dokumentiert sind. Mit diesem Thema liefert der SFB 313 einen wichtigen Beitrag zur Umwelt-Grundlagenforschung und steht in Beziehung zu zahlreichen Großforschungsprogrammen wie JGOFS, PAGES, CARDEEP, den POLYNIA-Studien, dem ODP-Leg 151 und zu GLOBAL CHANGE.

Der SFB 313 ist ein fachübergreifendes Verbundprojekt, an welchem Wissenschaftler verschiedener mariner Disziplinen aus sechs Universitätsinstituten und angeschlossenen Forschungseinrichtungen beteiligt sind. Seine Besonderheit liegt im interdisziplinären Forschungsansatz, der die Untersuchung der jungquartären Umweltbedingungen aus den Sedimentkernen mit dem Studium der Vorgänge verbindet, wie sie heute im offenen Ozean und am Meeresboden ablaufen. Diese sehr unterschiedlichen Forschungsansätze bieten die besondere Chance, über eine Quantifizierung der heutigen Prozesse und Stoffumsätze die Deutbarkeit von Umwelt- und Klimasignalen in den Sedimentkernen zu optimieren und damit realistische Ausgangsdaten für Paläoklima-Modelle zu gewinnen.

Entsprechend gliedert sich der SFB 313 in zwei große Themenbereiche. Im Teilbereich "Produktion und Sedimentbildung" stehen die Charakterisierung und Bilanzierung biologischer, sedimentärer und geochemischer Prozesse in der Wassersäule und am Meeresboden im Zentrum der Arbeiten. Im Teilbereich "Geschichte der Umwelt" werden die Formen und Eigenschaften fossiler Meeresböden im Bereich der Kontinentalränder, zeitlich hochauflösende Rekonstruktionen von Paläoozeanographie und Paläoklima aus den Tiefseekernen sowie die Geschichte der Planktongemeinschaften als wichtiger Informationsträger für Paläoumweltrekonstruktionen untersucht. Sie liefern die Randbedingungen für die numerische Modellierung von Stoffflüssen, Paläoozeanographie und Paläoklima.

Ein zeitaufwendiges Expeditionsprogramm in das Europäische Nordmeer sichert die umfangreichen Proben- und Datensätze, die für die Rekonstruktion von Stoffflüssen und Paläoumwelten unerlässlich sind. Die Expeditionen führten in den Jahren 1993 und 1994 sowohl in die eisfreien und ganzjährig eisbedeckten Regionen der Norwegensee und der Grönlandsee wie auch in die biologisch hochproduktive Eisrandzone. Die regionale Verlagerung der Aktivitäten aus der Norwegen- in die Grönlandsee in der zweiten Antragsphase folgt dem langfristigen Forschungskonzept des SFB 313. Ihre Bedeutung für eine Synthese ergibt sich aus der Tatsache, daß die Umwelt im Europäischen Nordmeer in ihren Prozessen und ihrer Geschichte nur über beide Oberflächenstromsysteme, den atlantischen Warmwassereinstrom und den polaren Kaltwasserausstrom, verstanden werden kann. Eine zentrale Frage der A-Projekte gilt der Bedeutung der Eisalgenblüten an den Eisrändern, die unabhängig von den Frühjahrsblüten einen eigenen Puls mit Folgen für die benthopelagische Kopplung hervorzurufen scheinen. Für die B-Projekte liefert der Eisrand eine wichtige Randgröße für die Modellierung.

Vor allem im B-Bereich wurden jedoch auch die Arbeiten in den atlantisch beeinflussten Seegebieten fortgeführt. Die Geschichte des atlantischen Salzförderbandes und seiner Folgen für die Tiefenwassererneuerung und den Wärmetransport in hohe Breiten sowie für die Entwicklung der pelagischen Gemeinschaften ist vor allem bei der Betrachtung in Zeitscheiben nur über die Grenzen einzelner Wassermassen hinweg zu verstehen. Die Untersuchungen auf dem Rockallplateau als Referenzstation im nördlichen Nordatlantik liefen weiter. Als Schlüsselregion zur Klärung des Phänomens kurzfristiger Klimaumschwünge im Bereich von Terminationen wurde die Dänemarkstraße mit einem eigenen Kernprogramm in die Arbeiten des SFB 313 aufgenommen. Die Expeditionen sind in internationale Programme eingebunden.

Der SFB 313 schaut heute auf eine 10-jährige Laufzeit zurück. Mit seiner begutachtung im September 1993 wurde er für weitere 3 Jahre bewilligt. Die interne Strukturierung des SFB wurde im wesentlichen beibehalten.

Aufgrund der Berufung einiger Kollegen auf Professuren an andere Universitäten kam es jedoch in einigen Teilprojekten zu Verlagerungen in der wissenschaftlichen Zielsetzung.

2. Beispiele aus den Arbeiten der Teilprojekte

Projektbereich A: *Produktion und Sedimentbildung*

2.1. *Pelagische Prozesse und Partikelfluß in der Eisrandregion*

Das Teilprojekt A1 des SFB 313 führt Untersuchungen pelagischer Produktionsregime und des vertikalen Partikelflusses im nördlichen Nordatlantik seit 1985 durch. Das übergeordnete Ziel ist es, die pelagischen Gemeinschaften und Prozesse in Abhängigkeit von abiotischen Umweltbedingungen und biotischen Wechselwirkungen im Pelagial zu erfassen. Dazu wurden primär diejenigen Prozesse untersucht,

die für die Bildung und Modifikation primärproduzierter organischer Substanz in der euphotischen Zone verantwortlich sind,

die den vertikalen Export von organischer Substanz aus der euphotischen Zone steuern

und die die Menge und Zusammensetzung der Partikel bestimmen, die in große Wassertiefen absinken und die Sedimentoberfläche erreichen.

Das Teilprojekt trägt dadurch mit Informationen über die rezenten Bedingungen des Partikelexportes zum Meeresboden zur Deutung von Verteilungsmustern benthosökologischer, meereschemischer, mikropaläontologischer und geologischer Variablen im SFB 313 bei. Dazu wurden in der Vergangenheit Langzeituntersuchungen mit verankerten Sinkstofffallen in der Norwegensee und Grönlandsee durchgeführt und mit prozeßorientierten Fallstudien auf Expeditionen kombiniert. Mit diesem Ansatz werden Vergleichsstudien (in der laufenden Antragsphase) mit Schwerpunkt auf Vorgänge in der Eisrandregion der Grönlandsee fortgeführt. Als neuer Aspekt sind dabei Untersuchungen direkt eisassoziiierter Prozesse, insbesondere der Bedeutung der Untereisfauna (überwiegend Amphipoden) für die saisonale Partikelproduktion und Sedimentation in das Forschungsprogramm aufgenommen worden. Die Felduntersuchungen werden durch Modellierungen flankiert, mit denen zentrale Prozesse im pelagischen Stoffumsatz im Hinblick auf ihre Funktion bei der Partikelsedimentation simuliert werden.

Zwei Aspekte der Arbeiten im Teilprojekt werden im Folgenden beispielhaft dargestellt: Für die Grönlandsee wird der Bezug zwischen den saisonal veränderlichen Produktions- und Exportbedingungen und der Variabilität der Eisbedeckung beleuchtet, der mit einem kombinierten Ansatz von Fernerkundungs- und Feldmethoden untersucht wurde. Die saisonale Bedeutung lateraler und vertikaler Transportprozesse verschiedener biogener Partikelklassen an den Rändern des Europäischen Nordmeeres wird am Beispiel einer Feldstudie am Ausgang der Barents-See dokumentiert.

Partikelfluß bei saisonal veränderlicher Eisbedeckung in der Grönlandsee

Die Grönlandsee und Norwegensee sind durch annähernd gleiche Nährstoffmengen, die dem Phytoplankton im Frühjahr für die Produktion zur Verfügung stehen, einen gleichen Jahresgang der Einstrahlung und durch nahezu identische jährliche Primärproduktionsraten (Neue und Regenerierte Produktion) charakterisiert. In Bezug auf die physikalisch-hydrographischen Voraussetzungen der Primärproduktion hingegen unterscheiden sie sich deutlich. In der ganzjährig eisfreien Norwegensee entwickelt sich eine saisonale Thermokline in der für temperierte Breiten typischen Art, während in der westlichen Grönlandsee im Einflußbereich des eisbedeckten Ostgrönlandstromes mit dem Beginn der Eisschmelze eine flache haline Schichtung entsteht. Während das saisonale Muster des Partikelflusses in der Norwegensee entscheidend von der Freßaktivität größerer herbivorer Zooplanktonorganismen (Copepoden) gesteuert wird, scheint die Variabilität in der eisbedeckten Grönlandsee primär durch physikalisch-hydrographische Effekte, wie Eisschmelze, Vermischungsereignisse und treibende Packeisfelder beeinflusst zu sein (5).

Messungen des vertikalen Partikelflusses wurden vom Teilprojekt A1 von 1988 bis 1992 im Gebiet des Jan-Mayen-Stromes (72° N / 10 - 7° W) mit ganzjährig verankerten Sinkstofffallen in drei Tiefen durchgeführt (500, 1000 und 2200 m). Die Verankerungspositionen waren so gewählt, daß sie regelmäßig während des Winters und in den Frühjahresmonaten (Dezember bis April) von Eis bedeckt waren. Der Beginn der Phytoplanktonentwicklung in der eisbedeckten Grönlandsee wird wesentlich von dem Rückgang des Eises und der Eisschmelze beeinflusst. Durch den Rückgang des Eises im Frühjahr und Frühsommer wird zum einen die Lichteinstrahlung in das Wasser ermöglicht, zum anderen gelangt durch die Eisschmelze salzarmes Wasser in die oberen Wasserschichten. In der Eisrandzone wird daher eine Stabilisierung innerhalb der euphotischen Zone schon früh im Jahr erreicht und damit günstige Bedingungen für die Planktonentwicklung geschaffen. Hier beginnt daher die Phytoplanktonproduktion ca. 1-2 Monate früher als in der zentralen eisfreien Grönlandsee und der benachbarten Norwegensee, wo die Erwärmung und damit die Stabilisierung der oberen Wasserschichten allein durch die Einstrahlung erfolgt (60, 33). Sowohl die Dauer als auch der Grad der Eisbedeckung im Untersuchungsgebiet sind hochvariabel: Die Eisbedeckung kann sich innerhalb weniger Tage stark verändern. Neben diesen kurzfristigen Änderungen sind auch interannuelle und längerfristige Schwankungen in der Eisbedeckung bekannt (32). Die großräumigen Eisbedingungen im Untersuchungsgebiet für die Jahre 1988-1992 sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die qualitativen Eisinformationen sind den wöchentlichen Eiskarten des Norwegischen Meteorologischen Institutes entnommen.

Die quantitativen Angaben wurden in Zusammenarbeit mit der Microwave Group, Ottawa River, Ontario, Kanada (Dr. R. Ramseier und Dr. C. Garrity) mit Hilfe der satellitengestützten Fernerkundung ermittelt (Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I). Der Sensor liefert unbeeinflusst von der Wolkenbedeckung zeitlich hochaufgelöste Informationen über die Eisbedeckung und deren kurzfristige (tägliche) Veränderungen. Es ist ersichtlich, daß in den Frühjahren 1990/1991 die eisbedeckte Fläche im Untersuchungsgebiet zwischen 71°N und 77°N sehr gering war und der Bedeckungsgrad (in %) 1990 ein Minimum aufwies. 1988 war dagegen die Eisbedeckung überdurchschnittlich hoch, während das Jahr 1992, aus dem noch keine quantitativen Daten zur Verfügung stehen, hinsichtlich der Eisbedeckung ein durchschnittliches Jahr gewesen zu sein scheint.

Jahr/Monat	März			April			Mai		
	NMI	%	km ² x 10 ⁵	NMI	%	km ² x 10 ⁵	NMI	%	km ² x 10 ⁵
1988	+	83.2	9.1	+	82.4	8.6	N	76.2	7.3
1989	+	81.6	8.5	-	84.4	7.0	-	84.8	6.1
1990	--	75.7	6.6	-	71.6	6.5	-	74.4	6.0
1991	N	82.5	6.1	--	84.6	5.9	--	84.0	5.3
1992	N			N			-		

Tabelle 1. Eisbedingungen in der Grönlandsee zwischen 71°N und 77°N in den Frühjahren 1988-1992 ermittelt aus Eiskarten und SSM/I Daten. NMI= Norwegisches Meteorologisches Institut, N = normal, + mehr als normal, - weniger als normal. -- Minimum, %= mittlerer Eisdeckungsgrad aus SSM/I Daten, km²= mittlere Ausdehnung des Eises ermittelt aus SSM/I Daten.

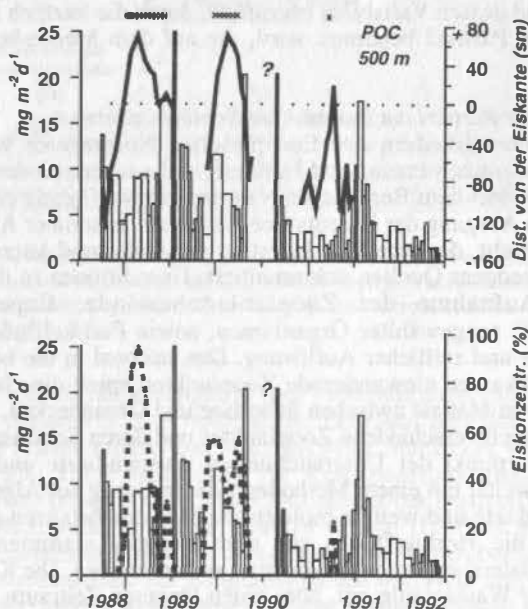


Abb. 3: Sedimentationsmuster des partikulären organischen Kohlenstoffes (POC) im Jan-Mayen-Strom und Entfernung der Verankerungsposition von der Eiskante (oben) und der Eisbedeckung in % (unten). Das ? kennzeichnet eine Periode hoher nicht quantifizierbarer Sedimentation, in welcher der Trichter der Sinkstoffalle verstopfte. Die Schraffur markiert die Dauer der Eisbedeckung an der Verankerungsposition.

Die Ergebnisse der Partikelflußmessungen in der Grönlandsee deuten auf einen frühen Wachstumsbeginn des Phytoplanktons (März/April) parallel zur saisonalen Auflockerung der Eisbedeckung hin, der sich im Anstieg der Sedimentation biogener Partikel widerspiegelt. Abb. 3 zeigt das saisonale Sedimentationsmuster für den partikulären organischen Kohlenstoff (POC) in 500 m Tiefe zusammen mit der Eisbedeckung an der Fallenposition und deren Entfernung vom Eisrand (Eisbedeckung <10%). Im Zeitraum 1988 - 1990 konnte ein Anstieg der Sedimentation biogener Partikel (im wesentlichen Diatomeen) mit einer 2-3 wöchigen Verzögerung registriert werden, nachdem eine Auflockerung der Eisbedeckung in den SSM/I Daten zu erkennen war (2). Ein deutlicher Anstieg des

vertikalen Partikelflusses wurde zu Zeiten registriert, als die Eiskante sich in der Nähe der Verankerungsposition befand und die Eisbedeckung stark variierte. Im Jahr 1991, in dem die Verankerungsposition nur kurz vom Eis bedeckt war und die Eiskante im Frühjahr die größte Entfernung von der Verankerungsposition aufwies (>40 sm), wurde die niedrigste jährliche Sedimentation der Jahre 1988 - 1992 und auch ein deutlich verändertes saisonales Sedimentationsmuster registriert (Abb. 3). Mit einem Maximum in den Sommermonaten zeigt es einen ähnlichen Verlauf, wie er aus den ganzjährig eisfreien Regionen des europäischen Nordmeeres bekannt ist und den Einfluß der veränderlichen Eisbedingungen auf die Produktions- und Sedimentationsprozesse in diesem Meeresgebiet.

Die Ergebnisse der Partikelflussmessungen im Jan-Mayen-Strom verdeutlichen die Bedeutung der Eisrandregion, die sich in der westlichen Grönlandsee nach Norden bis in die Framstraße erstreckt. Produktion und Sedimentation in dieser (produktiven) Region werden stark von der Dauer der Eisbedeckung, dem Grad der Eisbedeckung und dessen Variabilität beeinflusst, durch die letztlich auch die Menge und Qualität der Partikel bestimmt wird, die auf dem Meeresboden abgelagert werden.

Transport biogener Partikel am Barents-See Kontinentalhang

Von den Kontinentalrändern des Europäischen Nordmeeres werden Partikel verschiedener Zusammensetzung und Herkunft in die angrenzenden Tiefseebecken exportiert, stehen dort dem Benthos als Nahrung zur Verfügung und gelangen zur Ablagerung. Am Ausgang der Barents-See wurde ein saisonaler Ausschnitt dieses Prozesses untersucht, der eine Überlagerung vertikaler und lateraler Flüsse von Partikeln verschiedener Quellen dokumentiert. Expeditionen in dieses Seegebiet dienten der Aufnahme der Zooplanktonbestände, Experimenten zur Nahrungsbiologie ausgewählter Organismen, sowie Partikelflußmessungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Das saisonal in die hochproduktiven Zonen der Schelfkanten einwandernde Zooplankton spielt eine besondere Rolle beim Transport von Materie zwischen Schelfsee und Ozeanbecken. Die Produktion von Kotballen durch verschiedene Zooplankter und deren Schicksal (Abb. 4) war daher ein Schwerpunkt der Untersuchungen. Suspendierte und sedimentierte Partikel wurden weiter mit einem Methodenpaket in Bezug auf Algenpigmente und deren Abbauprodukte und weitere biologische Markersubstanzen (u.a. Alkenone) analysiert, um die Herkunft des aus dem Pelagial stammenden und vom Kontinentalhang lateral exportierten Materials zu beschreiben. Die Kombination von Beprobungen der Wassersäule mit, über einen längeren Zeitraum, integrierenden Partikelflußmessungen mit verankerten Sinkstoffallen hat dabei zusammen mit der Analyse spezifischer Partikelklassen und biologischer Markerverbindungen entscheidend zum Erfolg des Vorhabens beigetragen.

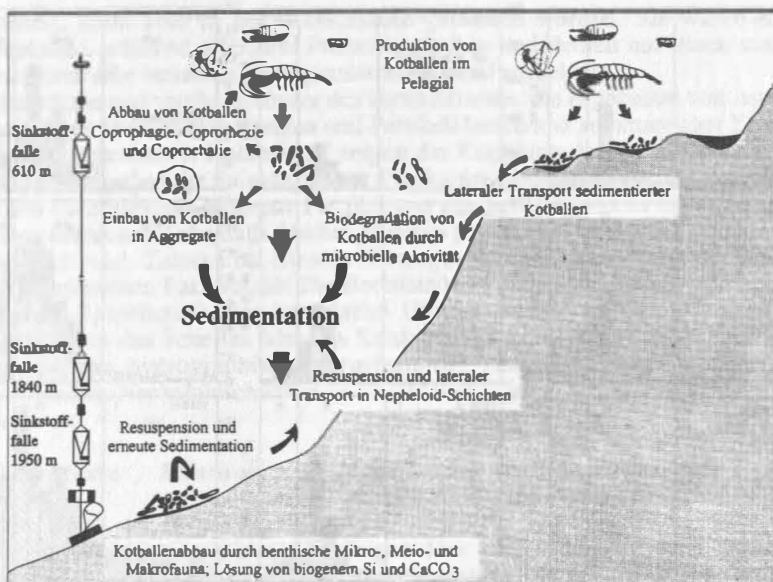


Abb. 4: Schematische Darstellung verschiedener Prozesse, die auf die Verteilung und das Schicksal der Kotballen des Mesozooplanktons in der Kontinentalhangregion einwirken. Die Abbildung zeigt außerdem die Positionierung einer Verankerung mit automatischen Sinkstofffallen am Kontinentalhang.

Ergebnisse der Partikelflußmessungen in drei Tiefenhorizonten am Kontinentalhang sind in Abb. 5 dargestellt. Der untersuchte Zeitraum läßt sich in drei deutlich unterschiedliche Phasen teilen: Von März bis Mitte Mai ist der vertikale Fluß sehr gering und es gibt keine Anzeichen für Resuspensions- und/oder advektive Transportereignisse (Phase I). Ab Mitte Mai nimmt der Partikelfluß bis zu einem ausgeprägten Maximum im späten Juni zu (Phase II). Dies gilt auch für die Sinkstofffallen in größeren Tiefen. Im Juli nahmen die Werte oberflächennah wieder ab (Phase III); die Zunahme der Fangmengen mit der Tiefe zeigt für diese dritte Phase intensive Resuspension und/oder lateralen Partikeltransport in Bodennähe.

Das Frühjahrswachstum in der Barents-See beginnt häufig schon im März, eine Sedimentation von Phytoplankton ist nach dem Maximum der Biomasseakkumulation im Mai/Juni beobachtet worden (60). Dieser Zeitrahmen stimmt mit dem Maximum des Partikelflusses während dieser Untersuchung überein, so daß ein advektiver Eintrag von relativ frisch produziertem biogenem Material aus der Barents-See zum Kontinentalhang in dieser Zeit möglich erscheint. Analysen der Algenpigmente unterstützen dies, da die Sinkstoffe in dieser Zeit einen hohen Gehalt an nicht abgebautem Chlorophyll a (Abb. 3), sowie auch Chlorophyll c1 und c2, Fucoxanthin, Diadinoxanthin und Alloxanthin aufweisen. Die in der Wassersäule suspendierten Partikel haben zu dieser Zeit eine identische Pigmentzusammensetzung. Die Sinkstoffe der zweiten Phase enthalten daher eine bedeutende Komponente wenig abgebauten, frischen Materials, während in der ersten und dritten Phase bei geringerem Fluß von Pigmenten stark abgebauter Detritus dominiert.

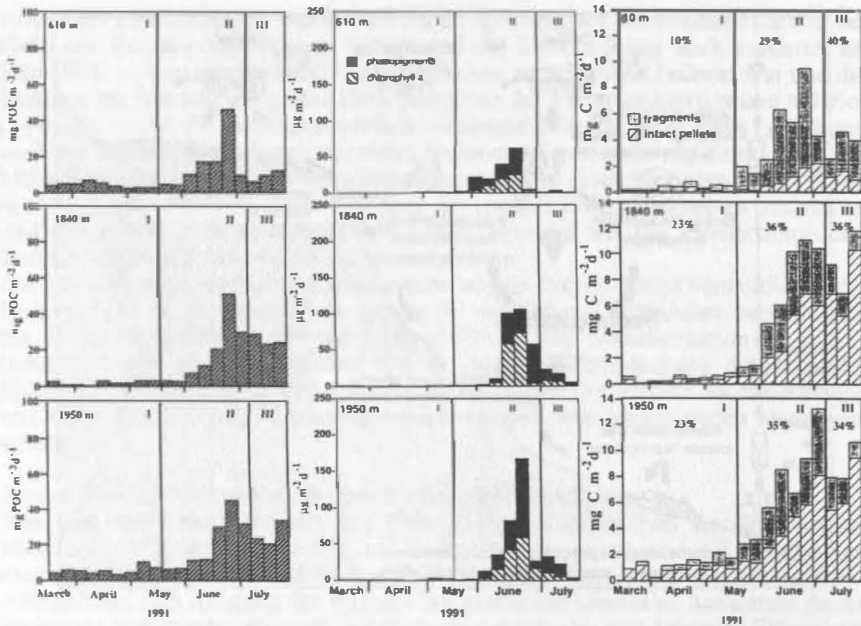


Abb. 5: Links: Fluß von partikulärem organischem Kohlenstoff (POC) Mitte: Chlorophyll a und Phaeopigmente (Abbauprodukte, die durch den Zooplanktonwegfraß entstehen); Rechts: In Kotballen gebundener org. Kohlenstoff (FPC), differenziert nach intakten Kotballen und Fragmenten. Angegeben ist zusätzlich der prozentuale Beitrag des FPC-Fluß zum gesamten Kohlenstofffluß. Verankerungseinsatz von März - Juli 1991 am Kontinentalhang der Barents-See in 610, 1800 und 1900 m Tiefe (Wassertiefe von 2000 m). Senkrechte Linien kennzeichnen 3 Phasen des Partikelflusses (5).

Die pelagischen Untersuchungen zeigen, daß das Zooplankton nicht im Verhältnis seiner Biomassen- und Artenzusammensetzung zum Partikelfluß beiträgt, sondern daß vermutlich verschiedene Organismengruppen unterschiedliche Funktionen ausüben. Der Zooplanktonbestand in der Wassersäule war von Copepoden (*Calanus finmarchicus*, *C. glacialis*, *Metridia longa*, *C. hyperboreus*, Arten der Gattungen *Euchaeta* und den *Amphipoden* sowie Ostracoden und Chaetognaten dominiert. Zum Export biogener Substanz in Form absinkender Kotballen trugen jedoch Ostracoden und vor allem (auch) Appendikularien (filtrierende Zooplankter, die ihre gelatinösen Gehäuse regelmäßig abwerfen) überproportional bei (Abb. 5). In allen Einsatztiefen der Sinkstofffallen fiel das Maximum der Kotballensedimentation in die zweite Phase und ist in dieser Zeit der direkten Sedimentation von frischem Phytodetritus überlagert. Die Zunahme der Kotballensedimentation mit der Tiefe könnte durch Freßaktivitäten unterhalb von 600 m bewirkt worden sein. Es ist jedoch möglich und wahrscheinlich, daß Kotballen auch zusammen mit anderem resuspendiertem Material hangabwärts transportiert wurden und so in die unteren, tieferen Sinkstoffallen gelangen. Indizien für einen solchen Lateraleintrag zusammen mit resuspendiertem Sediment sind chlorophyll-ähnliche Pigmentabbauprodukte, die sowohl auf der Sedimentoberfläche, als auch in den Fallenproben (besonders des bodennah eingesetzten

Gerätes), nicht aber in der Wassersäule gefunden wurden. Sie waren in den Sinkstoffen während aller drei Phasen enthalten und deuten auf einen stetigen, wenngleich sehr variablen Eintrag resuspendierter Partikel hin.

Das zeitliche und vertikale Muster des Partikelflusses, die Ergebnisse von Analysen spezifischer Markerverbindungen und Partikelklassen und summarischer Elemente wie dem organischen Kohlenstoff zeigen die Kopplung des Partikelexportes aus dem Epipelagial an die Saisonalität der Planktonentwicklung. Weiter verdeutlichen sie den Lateralexport biogener Partikel von der Schelfregion in die angrenzende Tiefsee der saisonal ebenfalls frisches Material pelagischer Herkunft enthalten kann. Effizienz und Zeitskalen dieses Eintrages hängen von biologischen und hydrographischen Faktoren ab. Die Bereitstellung dieses Materials (Sedimentation aus dem Epipelagial), der benthische Umsatz nach dem Eintreffen auf dem Meeresboden des Schelfes oder des Kontinentalhangs spielen dabei ebenso eine Rolle wie die hydrographische Steuerung des Transportes in bodennahen oder intermediären Nepheloidschichten.

2.2 Prozesse , Bilanzen und Modelle des Sedimenttransports

Klimawechsel können sehr rasch erfolgen. Das weiß man aus Untersuchungen an Eiskernen von Grönland und der Antarktis. Hier ist die erkennbare Jahresschichtung die verlässliche Grundlage aller Rückschlüsse auf das Klima vergangener Zeiten. In den normalen Ablagerungen des Ozeans sucht man vergeblich nach einer auch nur annähernd so guten zeitlichen Auflösung: Die Ablagerungsraten sind so gering, daß die auf und mehrere Zentimeter im Meeresboden lebenden Tiere die Dokumente mehrerer 100 - 1.000 Jahre durch Bioturbation verwühlen und vermischen. Kurzfristige Klimawechsel sind da nicht mehr erkennbar.

Etwas besser ist die Situation der zeitlichen Auflösung in Hochakkumulations-Gebieten am unteren Kontinentalhang. Statt 10 - 50 cm wie anderswo in der Tiefsee findet man bisweilen 10 - 20 m mächtige Ablagerungen für die vergangenen 14.000 Jahre seit der letzten Eiszeit. Zu diesen Mächtigkeiten konnte es aber nur kommen durch Advektion von Sedimenten in bodennahen Strömungen, die episodisch vom Schelf und oberen Kontinentalhang Ton, Silt und Feinsand erodierten und gravitativ in die Tiefe transportierten. Auf den ca. 10 - 200 km langen Transportwegen muß mit Sortierungseffekten gerechnet werden und im Akkumulationsgebiet sedimentieren sicherlich auch nicht überall Partikel aller Korngrößen.

Durch die geschilderten Umstände gestaltet sich die Interpretation von lokalen Sedimentabfolgen aus Hochakkumulationsgebieten schwierig. Die in der Zeit variierenden sedimentologischen Parameter wie Korngröße, Karbonatgehalt in verschiedenen Korngrößenfraktionen, Isotopenverhältnisse in biologischen Kalkpartikeln, Akkumulationsraten u.s.w. können nämlich verschiedene Ursachen haben:

- Wechselnde Liefergebiete.
- Physikalische und biologische Veränderungen in den Liefergebieten, z.B. durch Meeresspiegelanstieg, Eisrückzug und kurzfristige Klimawechsel.
- Physikalische und biologische Veränderungen auf den Transportwegen und in den Hochakkumulationsgebieten.

Bei der Ausdeutung geologisch-sedimentologischer Dokumente in Bezug auf rasche Klimawechsel haben wir also immer nur mittelbar über komplexe Zusammenhänge Zugang zum Paläoklima. Erst aus dem regionalen Kontext kann der lokale Befund verständlich werden. Es ist anzunehmen, und unsere bisherigen ozeanographischen Messungen stützen diese Vermutung, daß Sedimenttransport nur in kleinräumigen, kurzfristigen, seltenen aber hochenergetischen Episoden stattfindet. Das Interesse an diesen meßtechnisch schwer erfäßbaren Ausnahmeständen im Meer war bei den Ozeanographen bislang nur schwach entwickelt. Deshalb haben wir in den vergangenen Jahren die Intensität und die Meßtechnik eigener ozeanographischer Messungen verstärkt, um in Hochakkumulations-Gebieten und ihren Einzugsgebieten mit ausreichend hoher sedimentologischer Datendichte die ozeanographische Interpretation durch realistische Szenarios zu verbessern. Hinzu kam als neues Instrument die hochauflösende Modellierung von über die Schelfkante und den oberen Kontinentalhang kaskadierenden Trübungswolken (Sediment Plumes):

Die bereits bestehende Kooperation mit Ozeanographen aus dem IfM der Universität Hamburg zu Prozessen in der westlichen Barentssee wurde durch ein gemeinsames Vorhaben im Teilprojekt A2 intensiviert mit dem Ziel, die aus bisherigen sedimentologischen Befunden und den eigenen hydrographischen Messungen gefolgerten Vorstellungen über lokale Sedimenttransportmuster zu überprüfen und zu verbessern. Zu diesem Zweck wird ein in Hamburg entwickeltes numerisches Plume-Modell im Rahmen einer Doktorarbeit mit realistischen Annahmen über Aufnahme und Abgabe von Partikeln verschiedener Korngröße erweitert.

Im Rahmen der dargestellten allgemeinen Thematik wurde an folgenden Vorhaben gearbeitet:

Hochakkumulationsgebiete am Kontinentalhang

Die Kartierung von Mächtigkeit und Internstruktur dieser Sedimentkörper mit dem 3,5 kHz-Sedimentecholot zeigt eine deutliche Zuordnung zur Morphologie von Hang und Schelfkante: Hochakkumulationsgebiete liegen unterhalb von Vertiefungen in der Schelfkante, dort wo glazial geformte submarine Täler den Schelf queren. Bevorzugt in morphologischen Einbuchtungen des Kontinentalhangs erreichen sie eine horizontale Ausdehnung mehreren Zehner Kilometern. Ihre Obergrenze liegt immer einige 100 m unterhalb der normalen Untergrenze des Übergangsbereichs zum Atlantikwasser (Norwegenstrom), was für einen Zusammenhang mit Ereignissen maximaler winterlicher Tiefenkonvektion spricht. Vor großen Trogtälern wie Tränadjupe bei 67° N oder dem Bäreninseltrog (westl. Barents-See, 72° - 74° N) wird die Hangstabilität der Ablagerungen überschritten und Fließmassen bestimmen weiträumig das Bild. Hier macht für unsere Fragestellung die sedimentologische Bearbeitung keinen Sinn mehr.

Die Sedimente in den holozänen bis über 10 m mächtigen Hochakkumulationsgebieten sind feinkörnig (70 - 95% der Korngrößenfraktion <20µm). Im Zentrum der Mächtigkeit sind sie am feinsten. Am oberen Hang und auf dem äußeren Schelf haben sich auf präholozänen von Eisbergen gepflügten Ablagerungen Restsedimente gebildet. Das rechnerische Exportsediment ist über Korngrößenparameter mit den Ablagerungen im Hochakkumulationsgebiet vergleichbar.

Es erscheint uns unwahrscheinlich, daß allein die heute meßbaren winterlichen Prozesse bereits den Sedimenttransport erklären. Größere Korngrößen und die große Tiefenlage der Hochakkumulationsgebiete sprechen eher dafür, daß es seltene und größere aber den häufigen ähnliche Ereignisse sind, bei denen extreme Oberflächen- und interne Wellen noch die Sedimentaufnahme in den Liefergebieten verstärken.

Sediment Plumes in hohen Breiten und ihre sedimentologische Dokumentation im östlichen Europäischen Nordmeer.

Für die hydrographischen Arbeiten wurde eine Kombination von profilierendem akustischen Doppler-Strömungsmesser (ADCP) und eine Temperatur/Leitfähigkeitssonde (CTD) mit 2 Trübungs-Sensoren (Transmissiometer und Sensor für optische Rückstreuung) eingesetzt. Beide Systeme sind selbstregistrierend. In dem gleichen Gestell befanden sich auch drei Wassers schöpfer (2x12l und 1x30l), die gemeinsam über einen akustischen Auslöser geschlossen werden können.

Die winterliche Abkühlung und vor allem die Salzgehaltserhöhung bei der Meereisbildung treibt in hohen Breiten jedes Jahr eine von der Meeresoberfläche zur Tiefe fortschreitende Konvektion an. Erreicht diese saisonale Konvektion in flachen Bereichen den Meeresboden, werden dem Prozeß von der Topographie horizontale Komponenten aufgezwungen, d.h. die relativ schwere Wassermasse fließt durch Täler und am (Kontinental-)Hang in größere Tiefen ab ("slope convection" s. Abb. 6). Am Boden aufgenommenes feinkörniges Sediment erhöht evtl. die Dichte der Wassermasse und damit den Antrieb, vom Schelf in die Tiefsee abzufließen. Die Qualität der Sedimentfracht einer Wassermasse, ihre Temperatur und Salinität und die in ihr gelösten Stoffe können Auskunft über ihre Herkunft geben. Hochakkumulationsgebiete am Kontinentalhang können als integrales Ergebnis solcher Schelfwasserabflüsse die langfristige Bedeutung dieser Prozesse und ozeanographisch nicht mehr meßbarer Ereignisse zurückliegender Zeiten dokumentieren. Das ist für Geologen und Ozeanographen gleichermaßen von Interesse: Geologen erfahren etwas über den Einfluß marginaler Wassermassen auf hemipelagische Ablagerungen in der Tiefsee und das Paläoklima. Ozeanographen bekommen eine realistische Vorinformation für Meßstrategien und Annahmen bei der Modellierung von Prozessen der heutigen Tiefwasserbildung (Gravity Plumes mit und ohne Sedimentfracht) auf dem Schelf und am Kontinentalhang. Diesen Prozessen wird seit einigen Jahren von Seiten der Ozeanographie erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt.

In den weit voneinander entfernten Arbeitsgebieten bei den Lofoten, in der westlichen Barents-See und auch in der nördlichen Nordsee wurden zu verschiedenen Jahreszeiten 50 - 300 m mächtige Trübungsschichten am Meeresboden und im freien Wasser angetroffen, die teilweise noch ihre ursprüngliche Temperatur/Salzgehalts-Signatur von konvektiven winterlichen Mischungsprozessen auf dem Schelf aufwiesen.

Ihre Lage und Tiefe über dem Kontinentalhang erlaubte die Zuordnung zum Mündungsbereich von Quertälern auf dem Schelf (Storfjord und Kveitehola zwischen Bäreninsel und Spitzbergen, Traenadjuet und kleinere Gullies bei Röstbanken). Wir vermuten allerdings, daß die Hauptfracht dieser Sediment Plumes bereits vor unseren Messungen absedimentiert war. Die geplante räumliche Erfassung und Beprobung eines Sediment Plumes mit Sedimentfracht in einem der Arbeitsgebiete gelang bislang noch nicht.

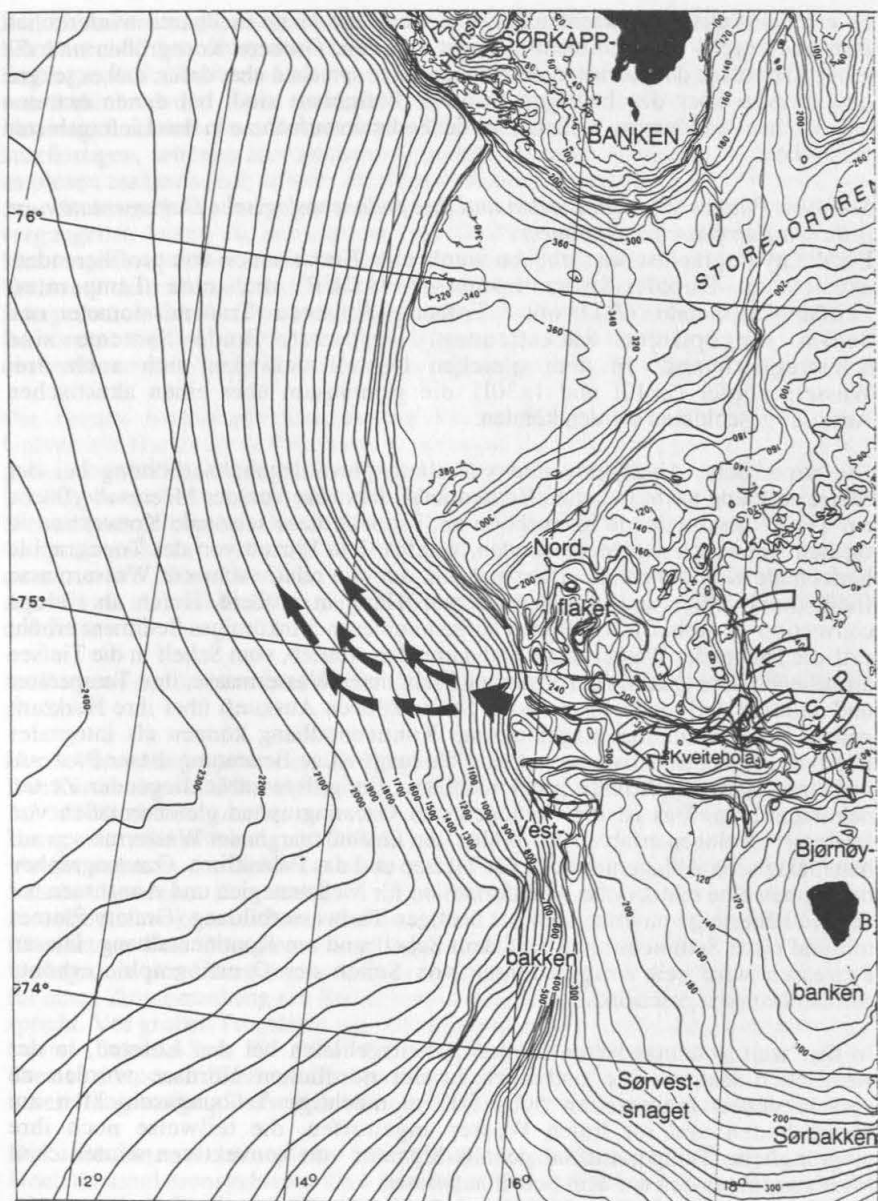


Abb. 6: Aus der Sedimentverteilung abgeleitete Abflußwege bodennaher Sedimenttransport-Ströme im Kveitholal (offene Pfeile) und Plume-Ausbreitung am Hang mit Sedimentation über dem Hochakkumulationsgebiet.

Von weiteren Untersuchungen erwarten wir neue Erkenntnisse auf zwei Gebieten:

1.) Ozeanographisch: Wie sind die Rand- und Startbedingungen für Schelfgebildete Wassermassen, um als Sediment Plume abzufließen? Hat die Aufnahme und Abgabe von Sediment einen Einfluß auf die Struktur und den Weg, den der Plume einschlägt. Gehört die Aufnahme von Sediment vielleicht zu den Startvoraussetzungen um die atlantische Deckschicht zu durchbrechen und zur Tiefwasserbildung im Europäischen Nordmeer beizutragen?

2) Geologisch: Wie groß muß ein Sediment Plume sein, um die Korngrößen-Zusammensetzung zu transportieren, die wir in den Akkumulationsgebieten am Kontinentallhang antreffen? Wie häufig (in ca. 10.000 Jahren) muß das geschehen, um das Sedimentvolumen zu erklären?

2.3 Besiedlungsmuster und Stoffeintrag im Benthos

Reaktionen des Benthos auf den vertikalen Partikelfluß

Im TP A3 werden die bodennahen Transportprozesse, die Modifikation des eingetragenen Materials und seit 1991 die Auswirkung dieser Stoffflüsse auf die Besiedlungsmuster am Meeresboden untersucht. Auf einer Tiefseestation auf dem Vøringplateau konnte eine Kopplung benthischer Prozesse an pelagische Sedimentationsereignisse nachgewiesen werden (16, 17). Durch mehrfache Beprobung dieser Station in den Jahren 1985-1992 läßt sich ein zusammengesetzter "Jahresgang" für Aktivitätsmuster der Sedimentgemeinschaft konstruieren. Eine Zusammenstellung dieser Daten zeigt, daß sich das Sedimentationsmuster, wie es aus Sinkstoffallen beschrieben wird, im Sediment abbildet mit einem Chlorophyll-Maximum im Juni und ein zweites im September auf. Chlorophyll a -Äquivalente können im allgemeinen sehr gut als Indikator für frisch sedimentiertes Material verwendet werden, da Chlorophyll im Sediment eine Halbwertszeit von nur ca. 3 Wochen hat.

Für den benthischen Stoffumsatz, gemessen als Sauerstoffzehrung des Sedimentes, ergibt sich ein ähnliches Muster mit maximalen Remineralisationsraten im Juni und September. Die Erfahrungen mit starken interannuellen Variationen des in Sinkstoffallen gemessenen vertikalen Partikelflusses gebieten jedoch Vorsicht bei der Interpretation von zusammengesetzten "Jahresgängen".

Bei einem regionalen Vergleich des sedimentierten Chlorophylls (Abb. 7a) wird deutlich, daß auf dem Vøring-Plateau mehr frisches Material mit hoher Nahrungsqualität den Meeresboden erreicht als an den Verankerungsstationen im Lofotenbecken (LB) und im Ostgrönlandbecken (OG) - ein Befund, der sich schon durch die größere Wassertiefe erklären läßt. Nur ein einziges Mal konnte bisher Tiefsee-Fluff mit sehr hohen Chlorophyll-Konzentrationen vor dem ostgrönländischen Eisrand gefunden werden (17). Der Eintrag von "frischem" Material auf der Fluff-Station schlägt sich in erhöhten Remineralisationsraten, vergleichbar mit erheblich flacheren Stationen auf dem Kolbeinsey-Rücken, nieder (Abb. 7b).

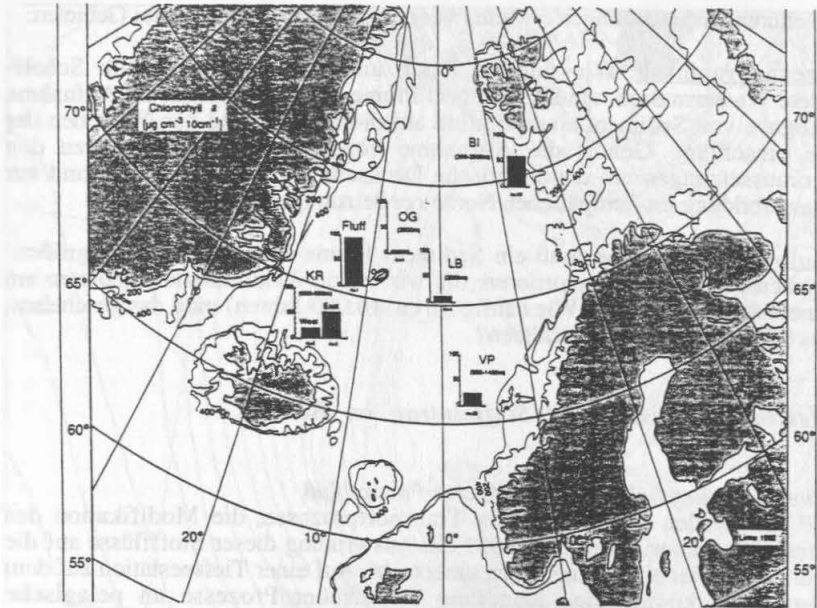


Abb. 7a: Regionaler Vergleich des sedimentierten Chlorophyll a. BI = Bäreninsel; LB = Lofoten-Becken; KR = Kolbeinsey-Rücken; OG = Ostgrönland-Becken; VP = Vøring-Plateau.

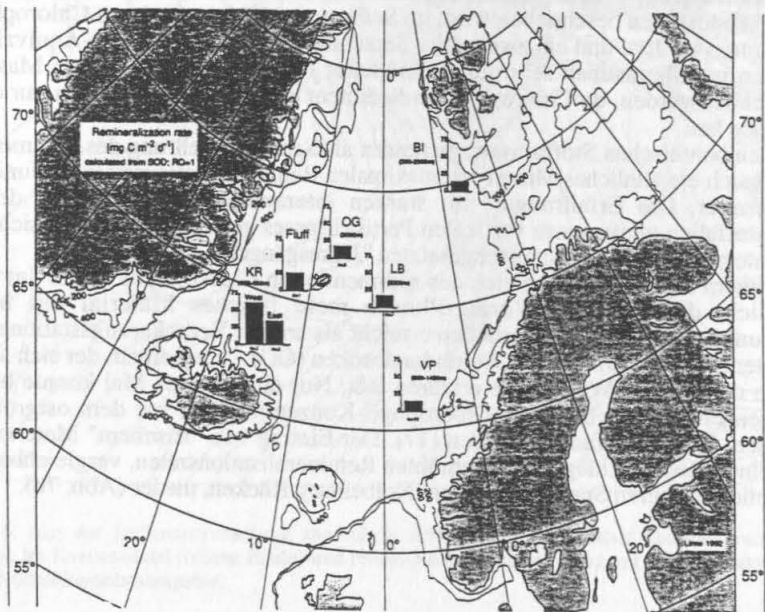


Abb. 7b: Regionaler Vergleich der Aktivität bodenlebender Organismen in Form von Remineralisierungsraten. Abk. wie in Abb. 7a.

Die Bedeutung der lateralen Partikeladvektion

Die Untersuchungen auf dem Vøring-Plateau haben ergeben, daß die Partikel als Sedimentationspulse den Meeresboden zunächst in homogener Verteilung erreichen und in das Sediment inkorporiert werden (21). Nach wenigen Tagen wird ein Großteil des eingetragenen Materials durch die Bioturbationsleistung der Makrofauna wieder an die Sedimentoberfläche zurücktransportiert.

Die Arbeiten des TP A2 haben verdeutlicht, daß ein erheblicher lateraler, hangabwärtsgerichteter Eintrag in ein Hochakkumulationsgebiet am Barents-See-Hang stattfindet (3). Thomsen (58) konnte die Existenz einer Resuspensionswolke 5 m über dem Sediment südlich dieses Hochakkumulationsgebietes nachweisen und zeigen, daß die Bakteriendichte im bodennahen Wasser dieses Gebietes doppelt so hoch ist wie außerhalb des Akkumulationsgebietes. Durch den Einsatz des Bodenwasserschöpfers auf einem Transekt entlang der vorherrschenden Strömungsrichtung über das Hochakkumulationsgebiet, das von einem dichten Polychaetenrasen besiedelt war hinweg, konnte erstmals eine Abschätzung des lateralen Partikeleintrages vorgenommen werden (Abb. 8). Zwischen 10 und 25 cm über dem Sediment war in Strömungsrichtung eine Abnahme der Partikel (TPM) um 41% zu verzeichnen. Eine Modellrechnung ergibt, daß der laterale Eintrag genauso hoch sein kann wie die Menge vertikal sedimentierender Partikel.

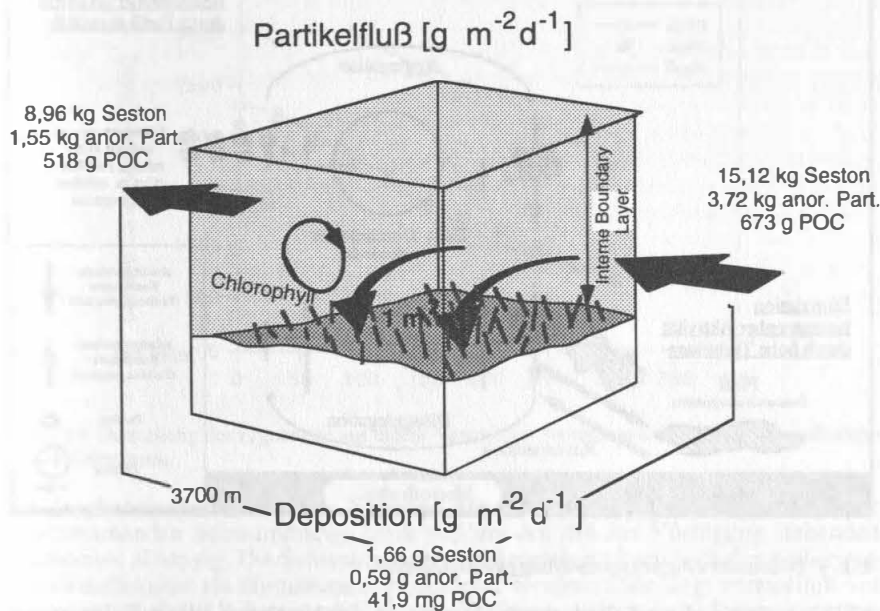


Abb. 8: Abschätzung des lateralen Eintrages in Strömungsrichtung über dem Hochakkumulationsgebiet auf dem Vøring-Plateau. POC = Partikulärer organischer Kohlenstoff; TPM = Transportiertes partikuläres Material.

Bodennah wurde an allen Stationen ein Gradient des partikulären organischen Kohlenstoffs (POC) beobachtet, der mit dem Abstand zum Meeresboden zunimmt. Im Gegensatz zu dieser "leichten" Fraktion, die länger in Suspension bleibt und lateral über weite Strecken verfrachtet werden kann, ist der sehr viel kleinere Teil, der noch nachweisbares Chlorophyll enthält, einer "schweren" organischen Fraktion zuzurechnen, die sich zum Meeresboden hin anreichert (Abb. 9) (57, 58).

Bakterien in der Bodennepheloidschicht

Sowohl im Flachwasser (39) als auch in der Tiefsee zeigen die Abundanzen, aber auch die Größenklassenverteilung von Mikroorganismen eine charakteristische Verteilung. Das Größenklassenspektrum der Bakterien verschiebt sich in 10 bis 40 cm Höhe über dem Meeresboden. Die Zellen werden zum Meeresboden hin größer. Eine Korrelation von Bakterienbiomasse mit der partikulären organischen Substanz legt eine Verbindung zwischen mikrobieller Aktivität und Partikelvorkommen nahe. In Strömungskanalexperimenten und auch im Feld (39) konnte gezeigt werden, daß Resuspensionsereignisse die Bakterienbiomasse im bodennahen Bereich signifikant erhöhen können. In Laborexperimenten wurde der Einfluß von Resuspension und anschließendem Transport in Suspension unter turbulenten Bedingungen auf natürliche Bakteriengemeinschaften simuliert. Anhand von Ratenmessung mikrobieller Aktivität, d. h. Inkorporation von ^{14}C - und ^3H -markierten Aminosäuren, konnte ein signifikant stimulierender Einfluß von Resuspension und anschließender Turbulenz festgestellt werden. Bakterien inkorporieren angebotene Substrate unter turbulenten Bedingungen bis zu 4,5-fach schneller.

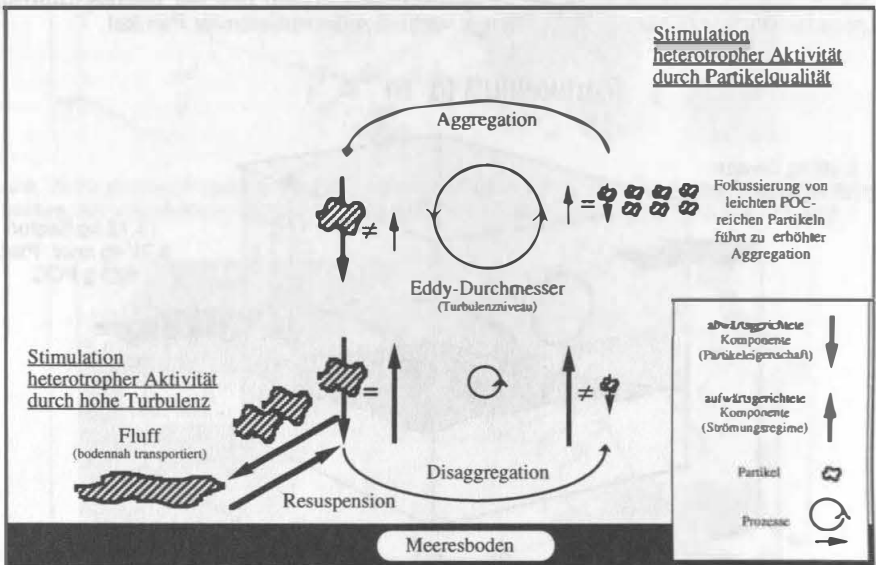


Abb. 9: Bodennahes Aggregations-Disaggregationsmodell.

1993 wurden während Felduntersuchungen in der Northeast Water Polynya auf dem nordostgrönländischen Schelf die kleinräumige Verteilung von bakterieller Aktivität in Bodennähe untersucht. Diese Untersuchungen zeigen, daß Bakterien in der Bodennepheloidschicht innerhalb der letzten 40 cm über dem Sediment signifikant aktiver sind als in der mittleren Wassersäule oberhalb 2m über dem Meeresboden. In einem bodennahen Aggregations-Disaggregationsmodell (Abb. 9) wird die gefundene kleinräumige Verteilung der bakteriellen Aktivität durch

hydrodynamische Sortierung von partikulärem organischem Material und Stimulation von partikelassoziierten Bakterien durch Turbulenz erklärt (40).

Biodepositionsleistungen dominanter Schwammarten und deren bathymetrische Verteilung der Schwammfauna am Barents-See-Hang

Neben den oben erwähnten Polychaeta können Schwämme einen bedeutenden Anteil der suspensionsfressenden Benthosgemeinschaft darstellen. Eine relativ schnelle Abnahme der Partikelkonzentrationen in Bodennähe konnte in Strömungskanal-Experimenten durch filtrierende Schwämme der Gattung *Thenia* nachgewiesen werden (Abb. 10). Schwämme können offensichtlich besonders effektiv im Bereich der kleinen Größenklassen filtrieren und so zur Biodeposition kleiner Partikel beitragen. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1.5 cm s^{-1} im Experiment zeigte sich eine kontinuierliche Abnahme der feineren Partikelkonzentration ($2\text{--}6 \mu\text{m}$), die über einen Zeitraum von 5 Stunden anhielt. Größere Partikel ($10\text{--}16 \mu\text{m}$) wurden von den Schwämmen wesentlich seltener aufgenommen.

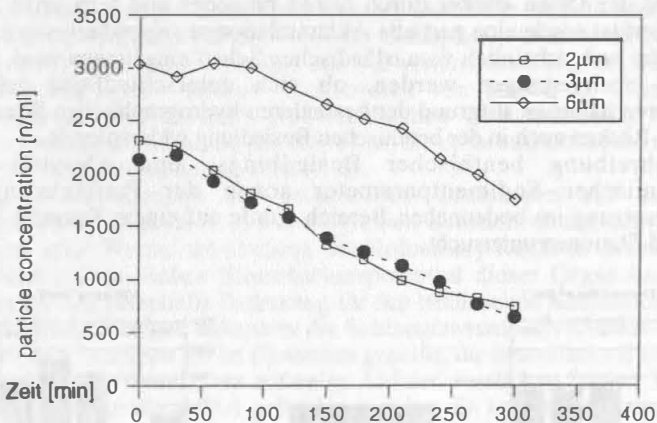


Abb. 10: Darstellung der Ergebnisse aus einem Versuch im Strömungskanal zur Partikelaufnahme durch Schwämme.

In flacheren Bereichen des Schelfes bis ca. 250 m Wassertiefe sind die vorkommenden Schwammarten stark von der Art des zur Verfügung stehenden Substrates abhängig. Die Schwammfauna am Schelfhang kann nach den bisherigen Untersuchungen als biomassearm bezeichnet werden. Dies liegt vermutlich vor allem an instabilen Substratverhältnissen. Wo Steine vorkommen, dominieren dünn inkrustierende Formen der Gattung *Hymedesmia*, die mit vielen Arten vertreten ist, aber nur eine geringe Biomasse aufweist.

Reicher wird die Schwammfauna in tieferen Bereichen unterhalb von ca. 1000 m. Bei insgesamt knapp 20 gefundenen Arten dominieren einerseits reine Weichbodenarten wie *Thenia abyssorum* und *Radiella sol*, andererseits finden sich ebenfalls Hartsubstratarten, die durch verschiedene Anpassungen Weichboden nutzen können. Ein Beispiel dafür ist *Tentorium semisuberites*, der gewöhnlich auf Fels sitzt, hier aber durch Aggregation von Foraminiferen und kleinen Steinen oder durch Ausbildung von Nadelschweifen auf Weichboden siedeln kann. Die meisten im tiefen Bereich vorkommenden Arten sind im Verhältnis zu den Flachwasserarten sehr klein, die einzige etwas massivere Art ist der Glasschwamm *Caulophacus*

arcticus. Die Biomassen der Schwammgemeinschaften scheinen nach den bisherigen Auswertungen jedoch im Tiefen durchschnittlich wieder etwas höher zu sein als am Hang.

Die in unserem Untersuchungsgebiet dominierenden Arten kommen mit zum Teil hohen Abundanzen vor und können daher generell als wichtige Modifikatoren des Partikelflusses am Tiefseeboden eingeordnet werden.

Stofffluß und Besiedlungsmuster auf einem Transekt über den Kolbeinsey-Rücken nördlich von Island

Auf der Expedition M21-5 mit dem Forschungsschiff METEOR wurde der Kolbeinsey-Rücken als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Der Kolbeinsey-Rücken ist die Verlängerung des mittelozeanischen Rückens nördlich von Island. Der SFB hat einen Transekt bei ca. 67°55'N untersucht, wo der Rücken eine Breite von ca. 34 km aufweist und von dem Kamm in ca. 500 m Tiefe bis auf ungefähr 1100 m abfällt (Abb. 11). Die rezenten Sedimentationsereignisse am Kolbeinsey-Rücken werden neben hydrographischen Prozessen durch terrigenen Partikeleintrag sowie biogene Partikelbildung in der Wassersäule, durch die Eisbedeckung, und submarine vulkanische Aktivität beeinflusst. Der Kamm zeichnet sich hauptsächlich durch Hartsubstrat oder grobkörniges vulkanisches Material aus, während der Norden und der Osten stärker durch feines biogenes und terrigenes Material charakterisiert ist sowie eine partielle Akkumulation resuspendierten organischen Materials, das wahrscheinlich vom isländischen Schelf eingetragen wird. Es sollte der Frage nachgegangen werden, ob sich unterschiedliche pelagische Produktionsverhältnisse aufgrund der besonderen hydrographischen Situation am Kolbeinsey-Rücken auch in der benthischen Besiedlung widerspiegeln.

Die Beschreibung benthischer Besiedlungs- und Aktivitätsmuster, biogeochemischer Sedimentparameter sowie der Partikelmenge und -zusammensetzung im bodennahen Bereich wurde auf einem Transekt über den Rücken an 5 Stationen untersucht.

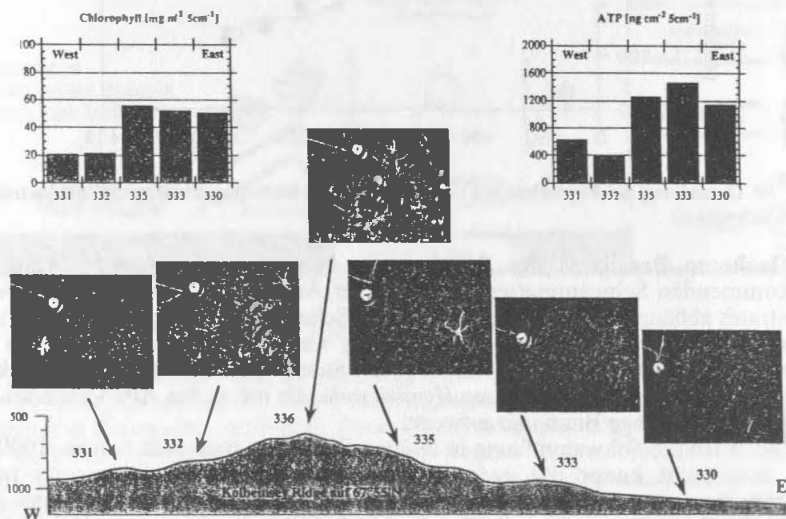


Abb. 11: Schematische Darstellung der Stationen auf dem Transekt über den Kolbeinsey-Rücken. Die Fotos stellen repräsentative Aufnahmen der jeweiligen Stationen dar und sollen auf die Unterschiede in der Besiedlung hinweisen. Außerdem sind in der Abbildung die Mengen an Chlorophyll a (Abbildung oben links) und ATP (Abbildung oben rechts), die in die obersten Zentimeter des Sedimentes inkorporiert sind, angegeben.

Die Unterwasseraufnahmen der Stationen ließen bereits Unterschiede in der benthischen Besiedlung an Ost- und Westhang des Rückens erkennen (siehe Fotos der Stationen in Abb. 11).

Einher mit den größeren Sedimentfraktionen am Westhang geht die Präsenz von großen megabenthischen Organismen, wie Schwämmen, Haarsternen und Weichkorallen, die auf gröbere Substrate zur Festheftung angewiesen sind.

Der Eintrag von Chlorophyll a sowie der ATP-Gehalt ist in den obersten Zentimetern des Sedimentes auf der Westseite geringer als auf der Ostseite (Abb. 11). Am Westhang waren die kleinen makrobenthischen peracariden Crustaceen seltener als am Osthang. Diese Tiere leben epi-, teilweise auch hyperbenthisch. Sie sind zusammen mit den endobenthischen Organismen verantwortlich für die Einarbeitung von sedimentierten chlorophyllhaltigen Partikeln in die obere Sedimentschicht (Abb. 11). Interessanterweise zeigt sich innerhalb der Peracaridengemeinschaften eine scheinbare Präferenz bestimmter Taxa für Substrate, bzw. für Stationen.

So sind Amphipoden auf den Westhangstationen die häufigsten peracariden Krebse. Diese Tatsache kann möglicherweise durch die Morphologie dieser Tiere und ihre Fortbewegungsweise erklärt werden. Durch die laterale Abflachung des Körpers und den Schutz der Beine durch die Coxalplatten könnten die Amphipoden einen Vorteil beim Graben zwischen den Schwammspiculae haben, ein möglicher Grund für das relativ seltene Vorkommen von Isopoden, Cumaceen und Tanaidaceen auf der Westseite. Auf den flachen Weststationen (335 und 333) hingegen dominieren eindeutig die Isopoden, die epibenthisch leben, aber auch in der obersten Sedimentschicht graben (7, 8).

Die hohen Abundanzen der peracariden Crustaceen auf den flachen Osthangstationen könnten in einem möglichen Zusammenhang mit den höheren Chl. a- und ATP-Werten am Osthang des Kolbeinsey-Rückens stehen (Abb. 11). Dies deutet auf ein hohes Bioturbationspotential dieser Organismen hin und dokumentiert ihre potentielle Bedeutung für den benthischen Kohlenstoffkreislauf. Hohe Abundanzen zeigen außerdem die Schlangensterne am Kolbeinsey-Rücken. Die bei weitem häufigste Art ist *Ophiocten gracilis*, die besonders auf den Stationen 332 und 335 hohe Abundanzen aufweist. Auf der westlichen Station 331 sind nur einzelne Individuen dieser Art gefunden worden. Es kann angenommen werden, daß die beobachtete Artenverteilung durch hydrographische Parameter beeinflusst wird. Am Osthang läßt sich eine Tendenz der Alterszunahme (weniger und größere Individuen bei der tiefen Station 330) feststellen, was wahrscheinlich auf die Entwicklungsbiologie dieser Organismen zurückgeführt werden muß (38).

Benthische Besiedlungsmuster in der Nordostwasser Polynya (NEW-Polynya, Grönland) spiegeln Prozesse in der Wassersäule wider

Benthische Besiedlungsmuster in der NEW-Polynya wurden im Rahmen eines multidisziplinären NEW-Projektes untersucht, um der Frage nachzugehen, ob eine direkte Kopplung in der Besiedlung der Bodenfauna mit der Produktion in der Wassersäule nachgewiesen werden kann. Während einer Expedition mit FS POLARSTERN (Mai bis Juli 1993) und zwei Expeditionen mit dem FS USCGC "Polar Sea" (Juli - August 1992 und 1993) in die NEW-Polynya wurden 5 taxonomische Gruppen an 69 Stationen in Tiefen zwischen 40-515 m untersucht, deren Größenspektrum sich über 6 Größenordnungen erstreckt (100 µm bis 10cm). Durch die multidimensionale Skalierung der Abundanzdaten der 5 Taxa konnten vier Zonen unterschieden werden: "Bank", "Belgica Trog", "Westwind Trog, West" und "Westwind Trog, Ost". Die Parameter, die die benthische

Nahrungsversorgung charakterisieren (Wassersäulen-Chlorophyll-Äquivalenzen, Nitratwerte, benthische Pigmente und biologische Sedimentaktivität) waren die wichtigsten Faktoren, die die Besiedlungsmuster der Nematoda, Polychaeta und Peracarida bedingen, während die Besiedlung durch Foraminiferen und das Megabenthos eher durch physikalische Sedimentcharakteristika bestimmt werden. Die Daten zeigen, daß die benthische Besiedlung in hohem Maße durch mesoskalige pelagische Prozesse (eine starke benthopelagische Kopplung) gesteuert wird, während abiotische Faktoren von eher sekundärer Bedeutung zu sein scheinen.

2.4 Stoffumsatz und diagenetische Modifikation von Produktivitäts- und Milieuindikation

Im Bereich der Wasseroberfläche wird organischer Kohlenstoff durch Organismen wie Diatomeen oder Coccolithophoriden produziert. Das Ausmaß dieser Primärproduktion wird unter anderem von den Lichtverhältnissen, der Wassertemperatur und der Nährstoffversorgung des Oberflächenwassers gesteuert. Diese Steuergrößen bilden sich in der Organismenhäufigkeit sowie in der Menge und chemischen Zusammensetzung der primärproduzierten organischen und anorganischen Verbindungen ab. Nachdem Absterben der Organismen verläßt ein Großteil des primärproduzierten organischen Kohlenstoffs (Corg) die sog. euphotische Zone und wird sedimentiert. Die biogeochemische Analyse der in Sedimenten überlieferten organischen und anorganischen Verbindungen erlaubt somit Rückschlüsse auf die Klimabedingungen, die in der Zeit geherrscht haben, in der die Organismen im Bereich der Wasseroberfläche bedingt wurden.

Dieses generelle Muster wird durch mikrobielle und physikochemische Prozesse, die bereits beim Transport der Partikel durch die Wassersäule und in den obersten Zentimetern des Sedimentes ablaufen modifiziert. Speziell im Bereich der Sediment/Wasser-Grenzfläche finden ausgeprägte Änderungen des, die Sedimentoberfläche erreichenden, Signals statt. Diesen Modifikationsprozessen muß Rechnung getragen werden, wenn aus den im Sediment eingebettetem Signal Rückschlüsse auf paläoklimatische Bedingungen abgeleitet werden sollen.

Die Untersuchung dieser Modifikationprozesse zählt zu den Arbeitsschwerpunkten des Teilprojekts A4. Dabei konzentrieren wir uns vornehmlich auf den Abbau von organischem Kohlenstoff, die Lösung von Opal (der z.B. von Diatomeen gebildet wird), partikulärem Barium und auf organismenspezifische Biomarkerverbindungen z. B. aus Prymnesiophyceen (C37, C38-Alkenone) sowie Isoprenoid- und Alkan-Verbindungen.

Hauptarbeitsgebiete in den diese biogeochemischen Untersuchungen durchgeführt werden ist der Ost-Grönlandische Kontinentalbereich, die Barents-See und das Norwegenbecken. In diesen Arbeitsgebieten wurden während mehrerer METEOR- und POLARSTERN-Expeditionen vom SFB 313 Sinkstofffallen verankert und Sedimentproben genommen.

Untersuchungen zum mikrobiellen Abbau von organischem Kohlenstoff in Oberflächensedimenten sollen neben der Modifikation des primärproduzierten Signals den Stofffluß von Kohlenstoff durch die Sediment/Wasser-Grenzfläche erfassen. Hierzu werden Oberflächensedimente beprobt und *in situ* Meßtechniken eingesetzt. Speziell die Messung von Sauerstoff in den Sedimentkernen ist eine wichtige Kenngröße für die Modellierung des mikrobiellen Abbaus von Corg. Diese Messungen werden mit Sauerstoffmikroelektroden im Labor und *in situ*

durchgeführt (Abb. 12). Aus dem Sauerstoffgradienten im Bereich der Sediment/Wasser-Grenzfläche und der Tiefe bis zu der Sauerstoff in das Sediment eindringt lassen sich regionale Unterschiede im Stoffeintrag quantifizieren. Ergänzt werden diese Messungen unter anderem durch die Bestimmung der Konzentration von Silikat, Nitrat oder Ammonium in den Porenwässern und Untersuchungen der Festphase z.B. hinsichtlich der Corg-, Opal- und Barium-Konzentration.

Aus der Stoffbilanz des sedimentierten Kohlenstoffs und den Mengen an Corg die in die sedimentäre Überlieferung eingehenden lassen sich so Aussagen über die Überlieferungswahrscheinlichkeit von Corg ableiten. Mit einem entsprechenden Ansatz kann die Überlieferungswahrscheinlichkeit von biogenem Opal und Barium bilanziert werden.

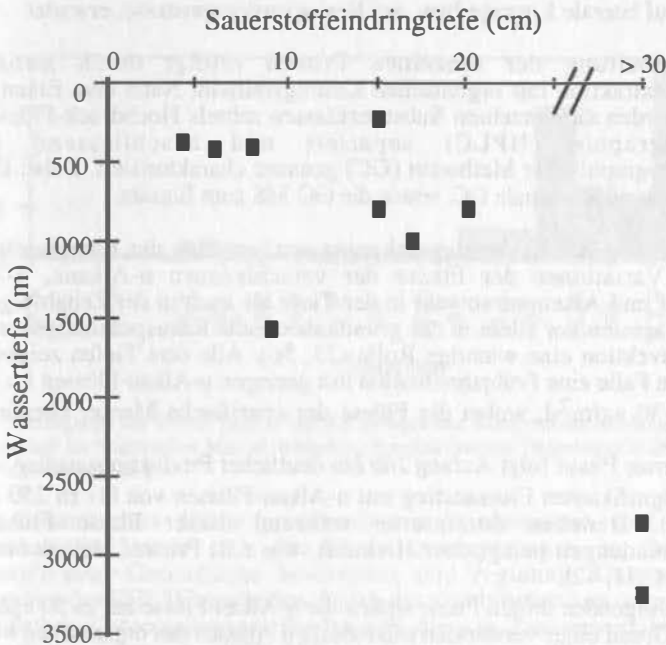


Abb. 12: Relation zwischen der Wassertiefe und der Sauerstoffeindringtiefe, die den oxischen Bereich des Sedimentes angibt. Die tendenzielle Zunahme der Sauerstoffeindringtiefe mit der Wassertiefe steht im Zusammenhang mit einer Abnahme des Flusses an organischem Kohlenstoff auf die Sedimentoberfläche. Die Daten wurden auf der POLARSTERN-Expedition ARK X/2 im Bereich von Ostgrönland (75°N) gemessen.

Neben diesen, auf anorganische Verbindungen und dem Kohlenstoffbudget ausgerichteten Arbeiten werden im Teilprojekt A4 organische Verbindungen untersucht, die von verschiedenen Organismengruppen gebildet werden. Die bisherigen chemischen und geochemischen Untersuchungen dieser organischen Biomarkerverbindungen konzentrieren sich auf Flüsse und Transformationen dieser Komponenten auf dem Weg durch die Wassersäule, innerhalb der bodennahen Grenzschicht, sowie an der Sedimentoberfläche. Organismenspezifische Biomarker der Prymnesiophyceen (C37, C38-Alkenone) sowie einfache Isoprenoid- bzw. Alkan-Markerverbindungen stehen dabei im Vordergrund. Die Kombination der verschiedenen Marker erlaubt Rückschlüsse auf Quellen bzw. die Transportraten des transportierten partikulären Materials (25, 56).

Eine Verankerungsstudie am westlichen Barents-See Kontinentalhang im Jahr 1991 lieferte erste Hinweise auf das saisonale Wechselspiel der einzelnen Komponenten. Zur weiteren Auflösung der saisonalen Unterschiede wurde eine Langzeitverankerung des Teilprojektes A1 im Norwegenbecken übernommen, aus der bereits grundlegende Daten (POC, Silikat, Carbonat) für die Jahresgänge 1991 bis 1993 existieren. Im Rahmen der FS. POLARSTERN-Expedition ARK X-1 wurde dazu im Herbst 1994 eine Jahresverankerung (NB8) mit zwei Sinkstoffallen im Norwegenbecken auf 3100m Wassertiefe ausgelegt. Daneben erfolgte die Beprobung des suspendierten partikulären Materials mittels neu entwickelter *In-Situ*-Pumpen. Die Verankerung soll im Juli diesen Jahres auf der FS. POSEIDON-Reise 209 aufgenommen und ausgetauscht werden. Aus den jahresübergreifenden Messungen werden Hinweise zur Rekonstruktion von spezifischen Produktivitäten aus sedimentär überlieferten Akkumulationsraten der Alkenone, sowie auf Hinweise auf laterale Einträge bzw. auf Resuspensionsprozesse, erwartet.

Die Aufarbeitung der einzelnen Proben erfolgt durch mehrmalige Ultraschallextraktion mit organischen Lösungsmitteln. Nach dem Einengen der Extrakte werden die einzelnen Substanzklassen mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) separiert und anschliessend mittels gaschromatographischer Methoden (GC) genauer charakterisiert. Dabei kommen auch die Multidimensionale GC, sowie die GC-MS zum Einsatz.

Die Auswertung der Kurzzeitverankerung nordwestlich der Bäreninseln zeigte deutliche Variationen der Flüsse der verschiedenen n-Alkane, n-Alkene, Isoprenoide und Alkenone sowohl in der Tiefe als auch in der Zeitabfolge (Abb. 13). Dabei spielen vor allem in der grundnahen Falle Resuspensionsprozesse und laterale Advektion eine wichtige Rolle (25, 56). Alle drei Tiefen zeigen in der bodennahen Falle eine Frühjahrsituation mit geringen n-Alkan-Flüssen im Bereich von ca 10-30 ng/m²d, wobei die Flüsse der spezifische Marker ebenfalls sehr gering sind.

Auf diese erste Phase folgt Anfang Juli ein deutlicher Produktionsanstieg, der sich in einem signifikanten Flussanstieg mit n-Alkan-Flüssen von bis zu 250 ng/m²d abzeichnet. Daneben dominieren während dieser Phase Flüsse von Markerverbindungen pelagischer Herkunft, wie z.B. Pristan, Heineicosahexaen oder C15 (4, 34, 42).

In der nachfolgenden dritten Phase sinken die n-Alkan-Flüsse auf ca 50 ng/m²d ab, liegen auf Grund eines verstärkten mikrobiellen Abbaus des organischen Materials höher als zu Beginn der Expositionsperiode. Das steht in guter Korrelation mit signifikant erhöhten Flüssen der Marker bakteriellen Ursprungs, wie z.B. des Squalens, das stark in Archeabakterien vorkommt (9). Daneben finden sich in der Zusammensetzung der Komponenten Hinweise auf kurzfristige Einträge von sedimentär beeinflusstem Material.

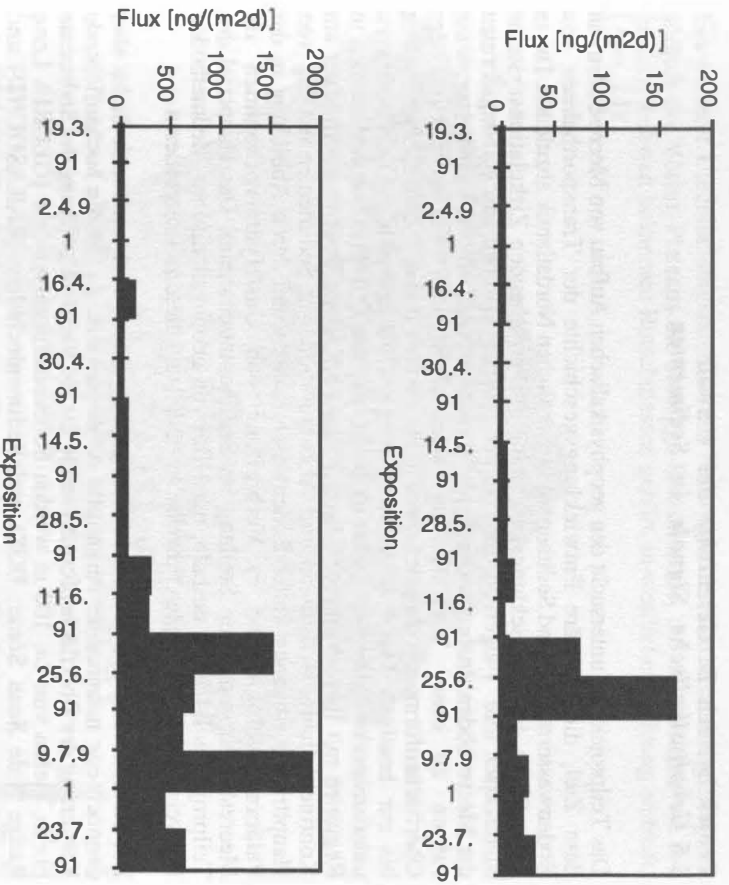


Abb. 13: Jahresgänge der Flüsse [ng/(m²d)] der pelagischen Komponente n-Alkan C15 (oberes Diagramm) und der bakteriellen Marker Verbindung Squalen (unteres Diagramm) in der bodennahen Falle der Verankerung Bl-2

In der Gesamtschau dieser geochemischen Porenwasser- und Sedimentuntersuchungen lassen sich die Modifikationsprozesse im Bereich der Sediment/Wasser-Grenzfläche bestimmen und regionale Unterschiede im Arbeitsgebiet des SFB 313 erarbeiten. Durch die Kombination von organischen und anorganischen Untersuchungsmethoden soll dies, in Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten des SFB 313 zu einem besseren Verständnis über die Bedeutung des Nord-Atlantiks für den geochemischen Stoffkreislauf von organischem Kohlenstoff, biogenem Opal und zur die Rekonstruktion von Klimabedingungen mittels Biomarker führen.

Projektbereich B: *Geschichte der Umwelt*

2.5 *Geophysikalische Signale in Sedimenten*

Das Teilprojekt B1 untersucht den geophysikalischen Aufbau von Meeresböden mit dem Ziel, die quartäre Entwicklungsgeschichte der Transportbahnen von Bodenwassermassen und Sedimenten im nördlichen Nordatlantik abzuleiten. Die in jeder Phase der Entwicklungsgeschichte vorherrschenden Zirkulationssysteme hinterlassen ihre "Fingerabdrücke" in den morphologischen Erscheinungsformen der Meeresböden. Insbesondere regional sehr unterschiedliche Transportprozesse führen zu einer Vielfalt von unterscheidbaren Veränderungen der Oberflächenformen, wobei sich diese teilweise über mehrere Zeitscheiben hinweg bis zur heutigen Meeresbodenmorphologie "durchpausen" (31). Zu den zu untersuchenden Prozessen gehört a) der gravitative Transport von Sedimenten in Regionen mit hangabwärtsgerichteten Kaskaden kalter Bodenwassermassen am Kontinentalhang, b) Erosion und Akkumulation von Sedimenten entlang von Haupttransportbahnen kalter Bodenwassermassen und deren Abbildung in der Paläomorphologie und c) Verbreitung von Gas/Hydratvorkommen am Meeresboden und deren Stellung im Sedimentationsraum. Das Hauptziel des Teilprojektes B1 ist es deshalb, mit Hilfe von geophysikalischen Meßmethoden Hinweise auf die genannten Prozesse zu finden und diese zu interpretieren.

Zur Realisierung der genannten Zielsetzung dienen drei unterschiedliche aber dennoch eng miteinander verknüpfte Arbeitsansätze. 1) Für die hochauflösende Kartierung der Oberflächenformen sowie für die Vertikalkartierung der Sedimente bis in Tiefen von ca. 100 m werden Seitensichtsonarsysteme (GLORIA Long Range Side Scan Sonar, EGS) und Sedimentecholote (PARASOUND) und geschleppte seismische Systeme (Airgun, Boomer) eingesetzt. 2) Mit Hilfe des "Multi Sensor Core Loggers" (MSCL) werden an 6 bis 12 m langen Sedimentkernen im Labor sedimentphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Durch diese Meßmethode kann die quartäre Entwicklungsgeschichte der Untersuchungsgebiete hochauflösend dokumentiert werden (29). 3) Sedimentphysikalische Eigenschaften der Sedimente aus Tiefen bis über 100 m lassen sich aus den Messungen mit dem in dieser Arbeitsgruppe entwickelten Hoch-Frequenz-Ozean-Boden-Hydrophon ableiten. Das System mißt hochauflösend die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schallwellen in Sedimenten und eignet sich daher besonders zum Nachweis von Gas in Sedimenten, da Gasvorkommen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten deutlich herabsetzen.

Das Hauptuntersuchungsgebiet erstreckt sich vom ostgrönländischen Kontinentalhang zum Mittelozeanischen Rücken. Diese Meeresregion wird gegliedert durch Schwellen und Becken und steht unter dem Einfluß der kalten südwärtsgerichteten Wassermassen der Arktis. Die Auswertung der Seitensicht-Sonaraufzeichnungen zeigt jedoch auch eindeutige Hinweise auf einen massiven hangabwärtsgerichteten Sedimenttransport in Form von submarinen mäandrierenden Kanalsystemen entgegen der derzeitigen Hauptströmungsrichtung von Bodenwassermassen. Direkte Messungen und Kernbeprobungen innerhalb eines Kanals ergaben, daß dieser derzeit wahrscheinlich inaktiv ist. Es wird daher vermutet, daß Zeiten starker Schmelzwasserereignisse am Übergang von Kalt- zu Warmzeiten die Aktivphasen der Kanalsysteme darstellen.

Ein weiterer Untersuchungsraum ist der Norwegische Kontinentalhang, wo sich südlich des Vöring-Plateaus die Storegga-Rutschmasse, die mit 5600km^3 zu den größten weltweit bekannten Rutschmassen gehört, in westlicher Richtung erstreckt (Abb. 14).

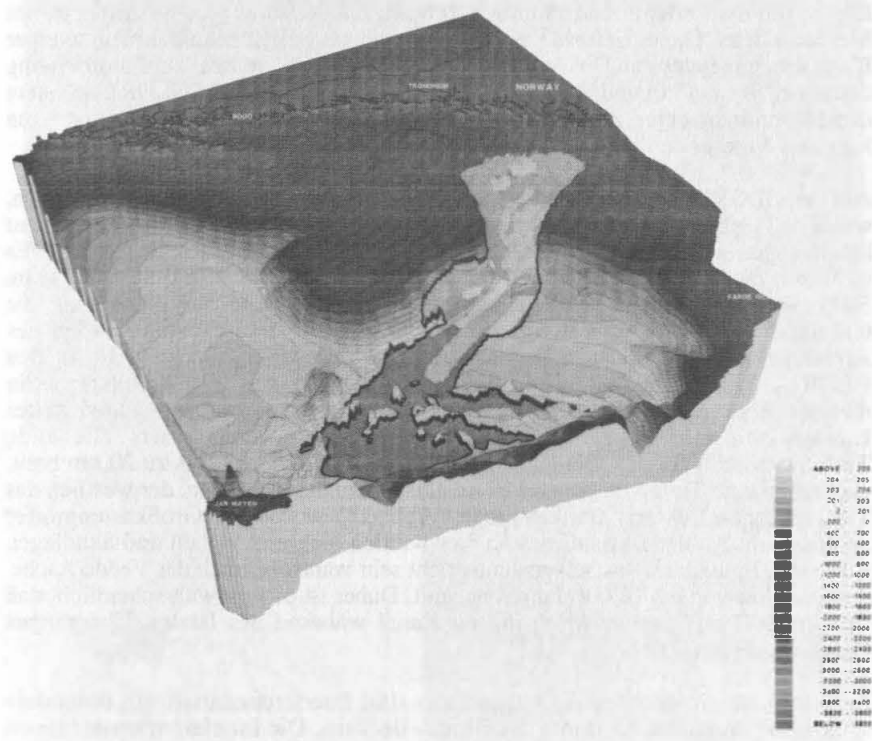


Abb. 14: Schematische Darstellung der Storegga-Rutschmasse am Norwegischen Kontinentalhang, die sich zwischen dem Vöring Plateau im Norden und dem Sedimentfächer der Norwegischen Rinne im Süden in einer Länge von über 100km nach Westen erstreckt.

Am nördlichen Rand dieser Rutschmasse wurden detaillierte geophysikalische Untersuchungen durchgeführt, die Hinweise auf den Zusammenhang von Gasvorkommen und Sedimentstabilität liefern können. Durch Sedimentecholotkartierungen mit Hilfe des PARASOUND-Systems und eines tiefgeschleppten Boomersystems (Britisch Geological Survey, Edinburgh), das ebenfalls Vertikalschnitte durch den Meeresboden bis in Tiefen von über 150 m liefert, konnten Hinweise auf mögliche Gasaustrittszonen im Sediment gefunden werden. In der Nähe einer möglichen Gasaustrittszonen wurde deshalb das neu entwickelte HF-OBH eingesetzt. Durch die Auswertung der Daten konnten zwei Schichten mit Mächtigkeiten von 5 bzw. 15 m identifiziert werden, die aufgrund der hier deutlich verminderten Kompressionswellengeschwindigkeit als gasführende Schichten interpretiert wurden. Die Geschwindigkeiten liegen weit unterhalb der Wasserschallgeschwindigkeit (1500m/s). Da die Tiefenlagen der Schichten (10 bzw. 50 m) mit den beobachteten Abrißflächen der Rutschmassen in guter Übereinstimmung sind, wird vermutet, daß gasführende Schichten eine entscheidende Rolle bei der Auslösung von Rutschmassenereignissen spielen.

GLORIA

GLORIA, das Weitwinkel-Seitensicht-Sonar des Institute of Oceanographic Sciences (IOS, Wormley, U.K.), wurde auf der Expedition mit dem FS LIVONIA im August/September 1992 vor Ostgrönland eingesetzt (30). Das GLORIA-System kartiert die akustischen Eigenschaften (Rückstreuung) des Meeresbodens. Die Daten, die man erhält, sind räumlich korrekt, das Resultat ist eine Art Foto des Meeresbodens. Die einzelnen Fotos werden wie bei Satellitenaufnahmen zu einer Karte zusammengesetzt. Die Auflösung der Daten beträgt vertikal zur Fahrtrichtung des Schiffes ca. 45 m und in Fahrtrichtung ca. 120 m. Damit das GLORIA-System den Höhenunterschied zwischen zwei Merkmalen des Meeresbodens registrieren kann, muß dieser demnach > 120 m betragen.

Auf der GLORIA-Karte sind unterschiedliche Sedimentationsmilieus zu erkennen, wie z.B. Gebiete in denen hangabwärtsgerichtete, strömungsbedingte, oder hemipelagische Sedimentation vorherrscht. Die Morphologie des Arbeitsgebietes. Es ist durch die großen Bruchzonen mit den dazu gehörigen Rücken geprägt. Im Süden ist dies die Jan Mayen Bruchzone. Darauf folgen in nördlicher Richtung die Grönland Bruchzone, die Hovgaard Bruchzone und im äußersten Norden des Arbeitsgebietes die Molloy Bruchzone. Durch diese Bruchzonen, die in den GLORIA-Aufzeichnungen sehr gut zu erkennen sind, wird das Arbeitsgebiet in mehrere Becken unterteilt. Das Grönland-Becken weist ein sehr gut entwickeltes Kanalsystem auf. Diese Kanäle wurden durch hangabwärts fließende Turbiditströme gebildet. Die Kanäle sind bis zu 500 km lang, bis zu 20 km breit, und haben eine Tiefe von bis zu 120 m. Aus einem dieser Kanäle, der westlich des Tiefseeberges Vesteris Banken liegt, (Abb. 15) wurde ein Großkastengreifer entnommen. An der Basis dieses Kernes wurden mehrere Aschen und Sandlagen gefunden. Eine dieser Aschelagen entspricht sehr wahrscheinlich der Vedde Asche, die ein Alter von ca. 10.000 Jahren anzeigt. Daher ist es sehr wahrscheinlich, daß der letzte Turbiditstrom durch diesen Kanal während des letzten Überganges Glazial/Interglazial floß.

Im äußersten Norden des Arbeitsgebietes sind Interferenzmuster ein besonders stark hervortretendes Merkmal des Boreas-Beckens. Die Interferenzmuster treten auf, wenn einige der Strahlen den Meeresboden erreichen und ihn dann durchdringen, um von einer tiefer liegenden Schicht reflektiert zu werden. Das bedeutet, daß die Strahlen die direkt vom Meeresboden reflektiert werden mit denen interferieren, die von einer tiefer liegenden Schicht reflektiert wurden. Diese tiefer liegende Schicht ist sehr wahrscheinlich eine grobkörnige Schicht. Dies ist auch die Art von Sedimentation die man in einem Gebiet erwartet, daß durch das saisonale Abschmelzen des See-Eises charakterisiert wird.

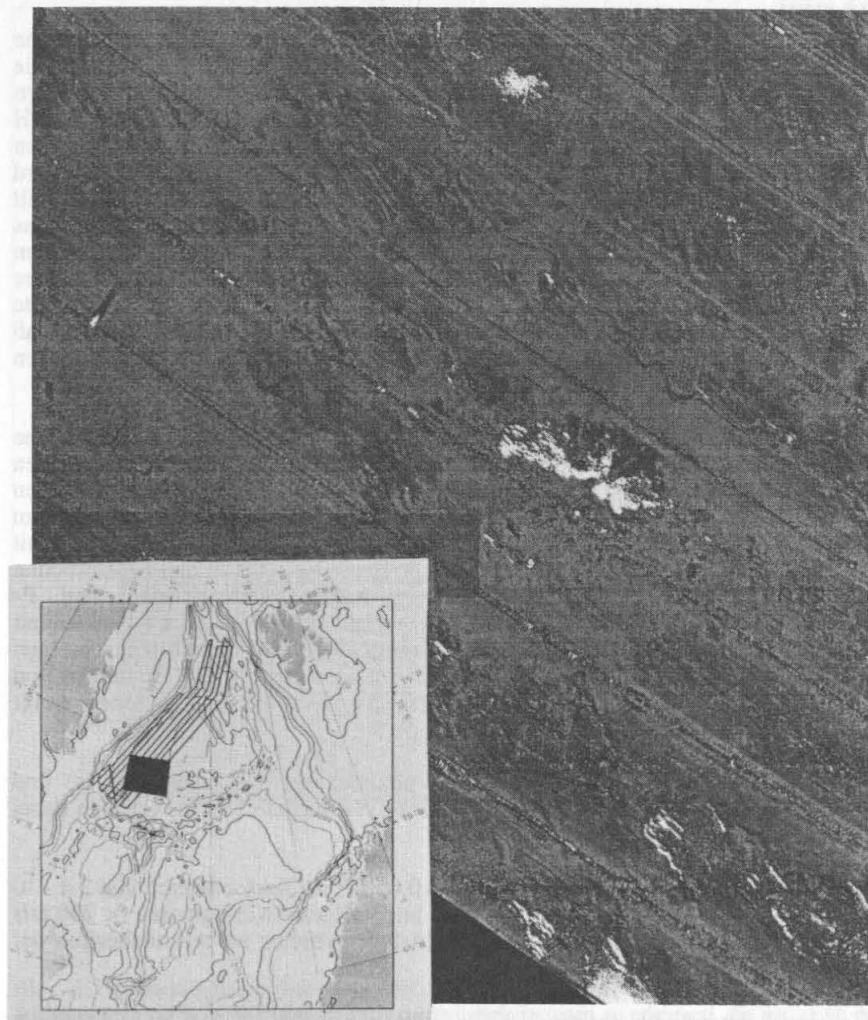


Abb. 15: Übersichtskarte (unten links) und Ausschnitt der GLORIA Weitwinkel-Seitensicht-Sonar Aufnahme. Die Übersichtskarte stellt die Profillinien entlang des ostgrönländischen Kontinentalhanges und den Ausschnitt (schwarzes Quadrat) der Sonar-Aufzeichnungen dar. In der Sonar-Aufzeichnung ist der mäandrierende Kanal (A) nördlich der Vesteris Kuppe (B) erkennbar. Die hellen Flecken zeigen starke Signalarückstreuungen des Meeresbodens an.

HF-OBH

Das HF-OBH-System wurde im Teilprojekt B1 entwickelt. Durch die Aufzeichnung von weitwinkelreflexionsseismischen Daten ist es möglich, die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Kompressionswellen in den Sedimenten zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird während eines Meßeinsatzes das HF-OBH zunächst auf dem Meeresboden abgesetzt. Nach dem Aussetzen einer akustischen Quelle (Boomer oder Pinger), die im Sekundentakt seismische Signale abgibt, wird die HF-OBH-Position so nah wie möglich entlang einer Profillinie passiert. Mit Hilfe von drei Hydrophonen und einer Unterwasserregistriereinheit zeichnet das HF-OBH am Meeresboden die aus unterschiedlichen Entfernungen kommenden Signale auf. Werden alle aufgezeichneten Spuren nebeneinander in einer Seismogrammmontage dargestellt, ergeben sich für jeden Reflektor gekrümmte Laufzeitkurven (Hyperbeln). Die Krümmungen dieser Laufzeitkurven sind ein Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb der durch zwei Reflektoren eingeschlossenen Sedimentschichten.

Das HF-OBH-System wurde erfolgreich in Flachwassergebieten und in der Tiefsee eingesetzt. Die von drei unterschiedlichen seismischen Quellen ausgestrahlten seismischen Signale lagen in einem Frequenzbereich von 300-6000 Hz und wurden mit dem am Meeresboden positionierten HF-OBH registriert. Mit dem tiefgeschleppten Boomersystem des British Geological Survey (BGS) konnten mit Frequenzen zwischen 300 und 2000 Hz hohe Eindringungen in den Meeresboden (150 m) (Abb. 16) bei gleichzeitig hohen Auflösungen von P-Wellengeschwindigkeitsintervallen (bis 3 m) erzielt werden. Insgesamt konnten mit Hilfe dieser Messungen Intervallgeschwindigkeiten für 16 Sedimentschichten ermittelt werden, wobei durch die hochauflösenden in situ Bestimmungen von Kompressionswellengeschwindigkeiten Niedriggeschwindigkeitszonen exakt lokalisiert konnten werden (Abb. 17).

Flachwassereinsätze in der Ostsee (Arkonabecken; Wassertiefe 46 m) und Tiefwassereinsätze in der Norwegischen See (Wassertiefe 890 m) ergaben dabei folgendes Bild:

Gashaltige Sedimentschichten (ca. 0.4 und 0.05 %) im Teufenbereich von 2.4 - 10 m charakterisieren durch extrem niedrige Intervallgeschwindigkeiten (< 700 m/s und < 1250 m/s) den Meeresboden des Arbeitsgebietes im Arkonabecken der Ostsee.

Niedriggeschwindigkeitszonen (1370 - 1440 m/s) in 10.5 m und 50 m Teufe am Kontinentalhang Norwegens (Storegga-Gebiet) repräsentieren 4 m und 15 m mächtige, vermutlich gashaltige Sedimentschichten in den oberen 150 m Sediment. Aufgrund dieser Ergebnisse können Hinweise auf potentielle Schwächezonen für das Abgleiten von Sedimentmassen gegeben werden. Da der Untersuchungsraum Norwegischer Kontinentalhang bekannt ist für das Vorkommen von massiven Sediment-Rutschungen, ist ein Erkennen von potentiellen Scherzonen von großer Bedeutung für die Ereignisvorhersage von Rutschungen.

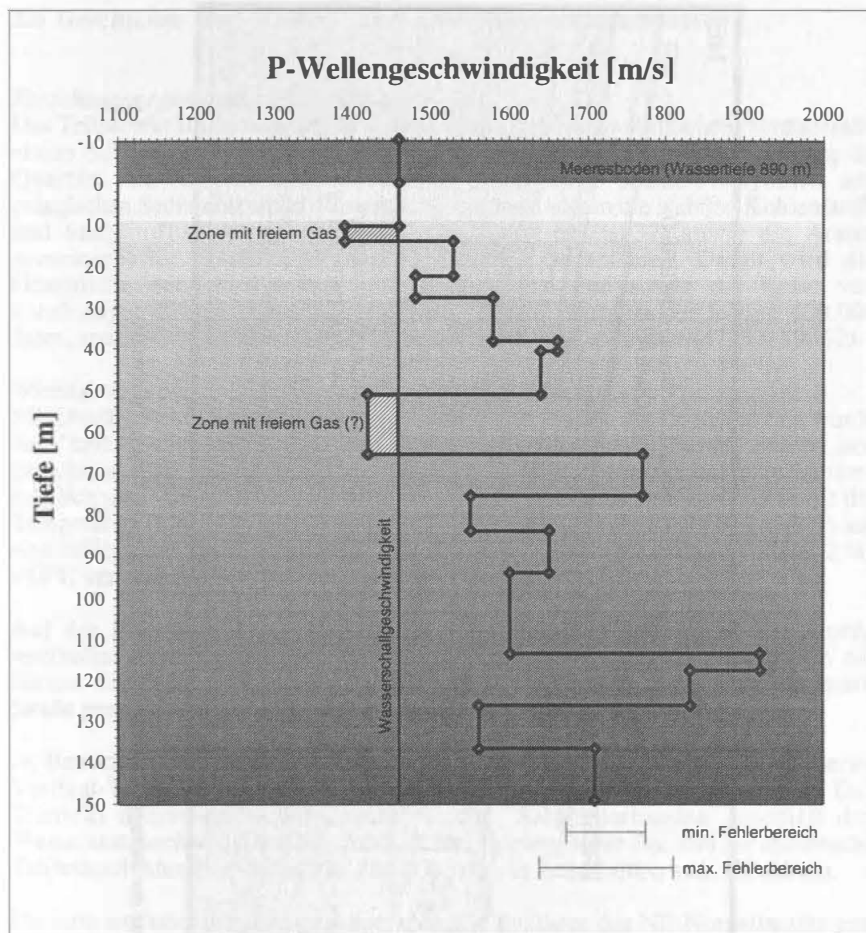


Abb. 16: Geschwindigkeitstiefenfunktion für die HF-OBH-Daten. Neben der Geschwindigkeitszunahme mit der Tiefe sind zwei Niedriggeschwindigkeitszonen zu erkennen, die unterhalb der Wasserschallgeschwindigkeit liegen.

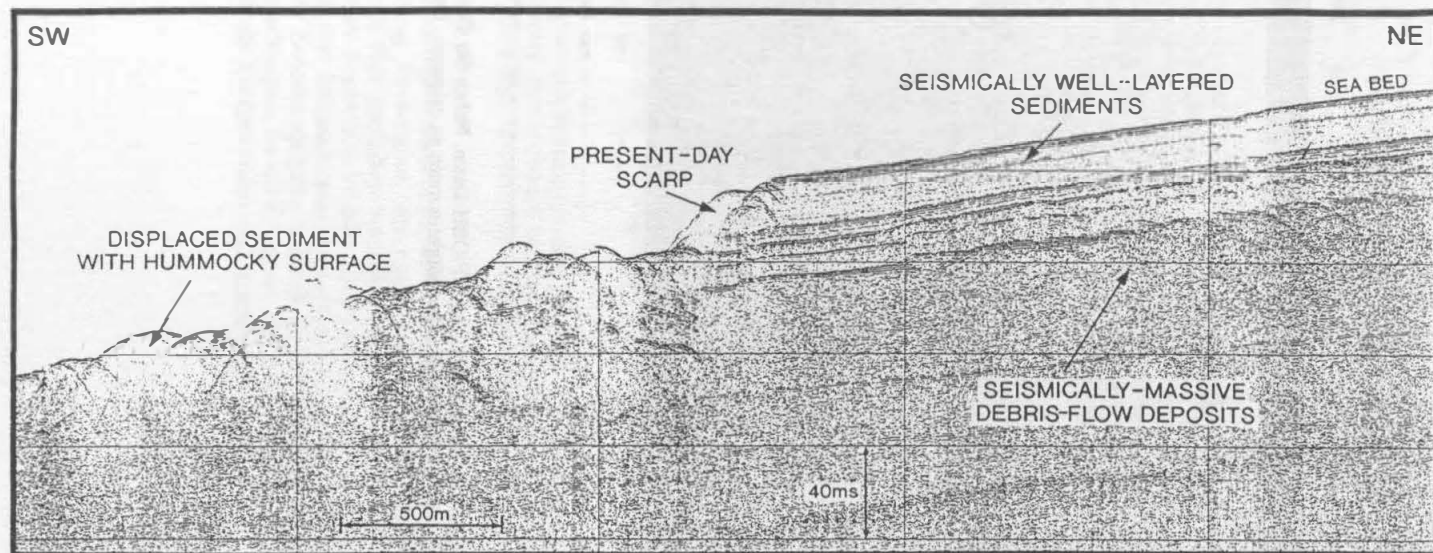


Abb. 17: Boomer-Profil entlang der nördlichen Abrißkante der Storegga Rutschmasse (British Geological Survey, Edinburgh).

2.6 Geschichte der Boden- und Oberflächenwassermassen

Forschungsgegenstand und Forschungsziele:

Das Teilprojekt B2 untersucht die Paläo-Ozeanographie im nördlichen Nordatlantik, einem Schlüsselgebiet zum Verständnis der natürlichen Klima-Entwicklung im Quartär. Als Arbeitsgrundlage dienen quantitative Klima-Proxydaten aus pelagischen Sedimentkernen. Wesentliche Befunde liefern die stabilen Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope, biogeochemische Analysen (Uk37) sowie die Artengemeinschaften planktischer und benthischer Organismen. Damit wird die Geschichte der Oberflächen- und Tiefenzirkulation sowie die Rolle von kurzfristigen Schmelzwasser-Ereignissen für den Zeitraum der letzten 400.000 Jahre, speziell der letzten 140.000 Jahre quantitativ rekonstruiert (47, 52, 59, 62).

Wichtige Ergebnisse 1993/94

Mit Oberflächensedimentproben der Meteor-Fahrt 26-3 in die Grönland See wurde das "kalte Ende" der Temperatur-Transfergleichung nach Foraminiferen neu geeicht, so daß jetzt Rekonstruktionen kalter Meeresoberflächentemperaturen möglich sind. Desgleichen wurde in Zusammenarbeit mit A. Rosell (Bristol) die Temperatur-Transfer-Gleichung nach Uk37-Werten (Alkenone als Biomarker) auf eine völlig neue Basis gestellt, die nunmehr auch im Temperaturbereich von -2 bis +10°C verlässliche Paläotemperaturwerte liefern kann (41).

Auf der Polarstern-Fahrt ARK X/2 in die Grönland und Island See wurde wertvolles Kernmaterial vom Nordhang Islands gewonnen. Daran läßt sich die Eiszeit-Geschichte des Austausches von Wassermassen durch die Dänemark Straße genau dokumentieren.

Im Bereich des Rockall Plateaus wurde mit rund 12 Sedimentkernen ein detailliertes Vertikal-Transekt der atlantischen Paläo-Tiefenwasserventilation erstellt. Das Transekt dokumentiert die Geschichte des "Salzförderbandes", speziell den Wasseraustausch zwischen NE Atlantik und Norwegischer See und die atlantische Tiefwasserbildung für die letzten 250 000 Jahre in Zeitschritten von 500 Jahren.

Für eine umfassende paläo-ozeanographische Synthese des NE-Nordatlantiks und Europäischen Nordmeers wurden die planktischen C- und O-Isotopenkurven der Kieler Arbeitsgruppe (ca. 65 Tiefseekerne) zusammen mit Isotopenkurven der Arbeitsgruppen in Bergen und Cambridge (ca. 25 Kerne) und anderen publizierten Kurven (mehr als 20 Kerne) auf eine gemeinsame hochauflösende Zeitachse der letzten 55.000 Jahre gebracht. Vergleicht man die Verbreitungsmuster stabiler Isotope in zahlreichen paläoozeanographischen Zeitscheiben, so schälen sich in diesem Raum drei Hauptzustände der Oberflächenzirkulation heraus: 1. der Holozän-Modus während der letzten 14.700 Jahre (Abb. 17a); 2. der Eiszeit-Modus, bei dem das Nordmeer mit seiner Zirkulation vom NE Atlantik weitgehend abgeschnitten, nach den hohen Oberflächentemperaturen vermutlich aber trotzdem saisonal eisfrei war (Abb. 17b); 3. der Modus großer Schmelzwassereinbrüche im Nordmeer, so vor ca. 18.000-17.000 (Kal.) Jahren (Abb. 17c). Diese Einbrüche verursachten kurzfristig, innerhalb von Jahrzehnten, eine Umkehr der wesentlichen Strömungssysteme in der Norwegischen See und eine Umkehr des globalen ozeanischen "Salzförderbands" (Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe E. Jansen, Bergen, J. C. Duplessy und L. D. Labeyrie, Gif-sur-Yvette, M. A. Maslin und N. J. Shackleton, Cambridge, sowie mit H. Erlenkeuser und zahlreichen anderen Kollegen in Kiel). Die im Teilprojekt B2 rekonstruierten Strömungsmodi stimmen weitgehend mit Zirkulationsmustern überein, die am Rechner simuliert werden.

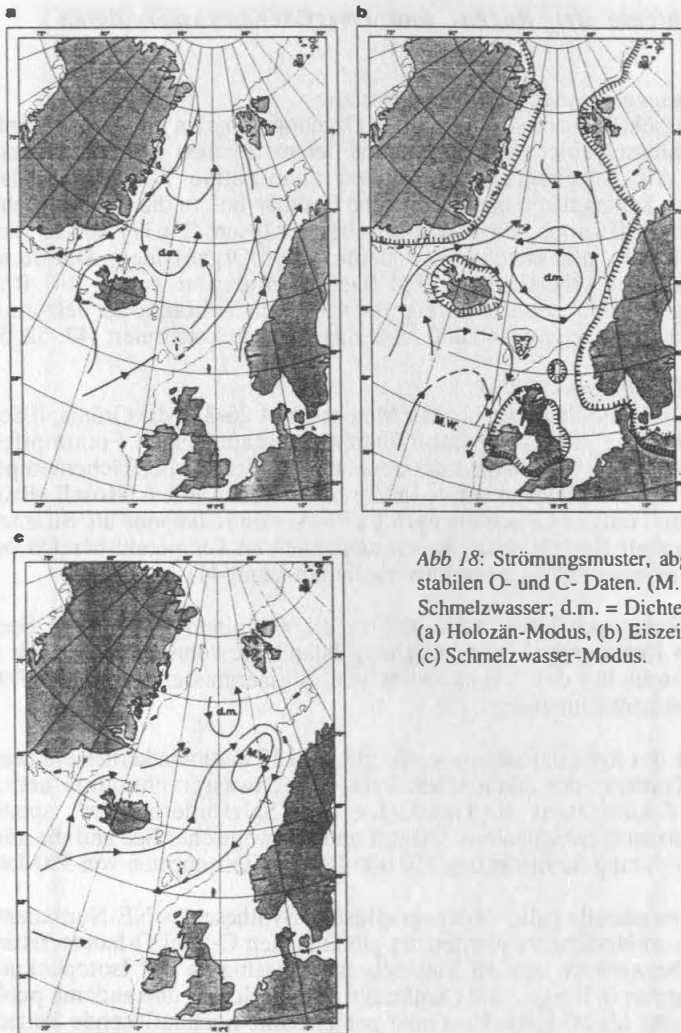


Abb 18: Strömungsmuster, abgeleitet aus stabilen O- und C- Daten. (M.W. = Schmelzwasser; d.m. = Dichtemaximum):
(a) Holozän-Modus, (b) Eiszeit-Modus, (c) Schmelzwasser-Modus.

Plankton- und Benthosforaminiferen belegen während der letzten und früheren Eiszeiten einen Einstrom in die Island See über die Dänemark Straße, ein Einstrom, der zumindest vorübergehend wesentlich bedeutender war als heute (1, 54). Mit benthischen Foraminiferen des Nordisland-Rückens lassen sich die Änderungen der Zirkulation während der Jüngerer Dryas rekonstruieren.

Neugründung

Im Jahre 1993 hat die Math.-Nat. Fakultät der CAU auf Betreiben des Geologisch-Paläontologischen Instituts und des SFBs das "Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung" neu gegründet. Diese Gründung umfaßte die Berufung eines neuen Direktors (Prof. Dr. P. Grootes), die Sicherung des Grund-

Personalstandes, den Baubeginn eines Laborgebäudes und die Bestellung eines Tandem-Massenbeschleunigers bei einer Firma in Holland. Das im Aufbau

befindliche Labor soll ab dem späten Frühjahr 1995 in Betrieb gehen und mit seinen hochwertigen (^{14}C - und ^{10}Be -) Altersbestimmungen einen wesentlichen Beitrag zur Sicherung der Forschungsqualität u.a. am Sonderforschungsbereich 313 leisten.

2.7 Paläontologie des Pelagials - Veränderungen im Jungquartär

Das pelagische Plankton gehört zu den wichtigsten "Sedimentproduzenten" der Weltmeere. Ziel des Teilprojektes B3 ist eine synoptische Darstellung der räumlich-zeitlichen Entwicklung von Planktongemeinschaften im Jungquartär des Europäischen Nordmeeres. Die Planktongemeinschaften sollen in ihren Abhängigkeiten von Paläoozeanographie und Paläoklima analysiert werden. Von früheren Bearbeitern wurden bisher hauptsächlich einzelne Planktongruppen isoliert voneinander untersucht. Die verschiedenen Gruppen müssen jedoch als Bestandteile regional differenzierter Planktongemeinschaften aufgefaßt werden, die nur gemeinsam die ozeanographischen Verhältnisse adäquat abbilden. Deshalb wird für die Untersuchungen ein synoptischer Ansatz gewählt, in welchem ausgewählte Planktongruppen an den gleichen Probensätzen bearbeitet und miteinander verglichen werden.

Die zum Teil drastischen Unterschiede zwischen Lebend- und Fossilgemeinschaften machen zudem einen aktualistischen Ansatz notwendig, um die Prozesse zu beschreiben und zu quantifizieren, die zur Veränderung während der Sedimentations- und Fossilisationsvorgänge führen (Abb. 1). Voraussetzung für den Vergleich von Lebendgemeinschaften mit Fossilgemeinschaften ist die Beschränkung auf schalen- oder skelettbildende Planktongruppen. Die ausgewählten Gruppen (Coccolithophoriden, Diatomeen, Dinoflagellaten-Zysten, Radiolarien und Foraminiferen) bauen Skelette und Hüllen aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichem Erhaltungspotential auf. Sie umfassen photoautotrophe und heterotrophe Einzeller, deren unterschiedliche Biologie voneinander abweichende Lebensweisen und -strategien und damit auch differierende Abhängigkeiten von verschiedenen ökologischen Faktoren bedingt (Abb. 19).

Die Untersuchungen erfolgen an lebenden Planktongemeinschaften, Sinkstoffallenmaterial aus der Grönland- und Norwegensee und Proben jungquartärer Sedimente (Abb. 20) von fünf Stationen im Bereich der Atlantischen Wassermassen der Nordatlantik-Drift und des Norwegenstromes sowie im Bereich der Arktischen Wassermassen.

Folgende Themen werden bearbeitet:

- Verbreitung der Planktongruppen im Pelagial im Hinblick auf den Jahresgang und ihre horizontale und vertikale Verbreitung in den Wassermassen. Dabei wird die Kopplung einzelner Arten bzw. Artengruppen an unterschiedliche ökologische Faktoren und hydrographische Parameter besonders berücksichtigt.
- Partikeltransport durch die Wassersäule und Veränderungen der planktischen Sinkgemeinschaft unter Berücksichtigung der Saisonalität der Phytoplanktonproduktion sowie des unterschiedlichen Erhaltungspotentials von Skelett und Hüllen der verschiedenen Gruppen.

- Vorkommen und Zusammensetzung von Fossilgemeinschaften in Oberflächensedimenten und ihr Vergleich mit den Lebendgemeinschaften der überlagernden Wassermassen. Diese Untersuchungen sollen klären, inwieweit die Fossilgemeinschaften die ehemaligen Lebendgemeinschaften widerspiegeln und dadurch Rückschlüsse auf den Lebensraum und die kennzeichnenden ökologischen Faktoren erlauben.
- Vorkommen, Zusammensetzung und Häufigkeit der verschiedenen Planktongruppen im Jungquartär. Durch den quantitativen Vergleich der verschiedenen Gruppen können diagenetische Einflüsse von ökologischen Gegebenheiten getrennt und Aussagen über die Entwicklung der Planktongemeinschaften im Jungquartär getroffen werden.

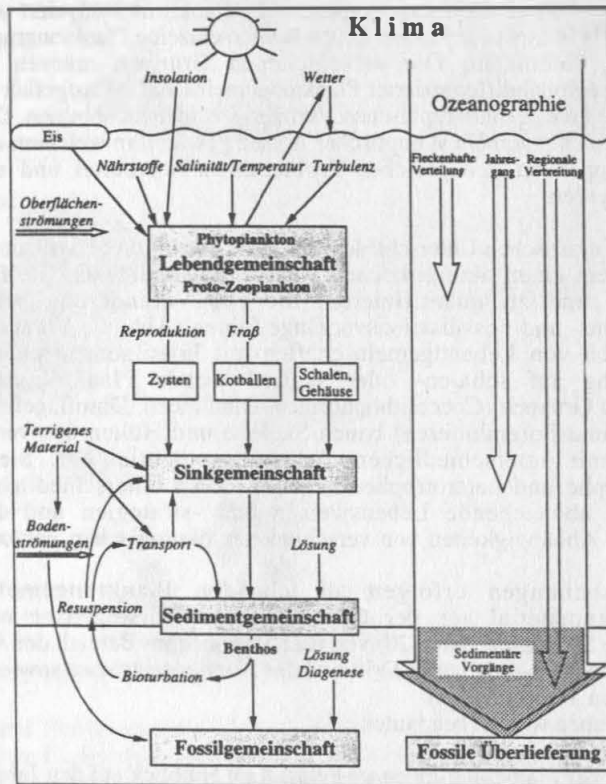


Abb. 19: Flußdiagramm zur Darstellung der relevanten biologischen und sedimentären Prozesse mit ihrer Wirkung auf den Partikeltransport (links). Die Darstellung auf der rechten Seite der Abbildung zeigt die Verzerrung des Informationsgehaltes der Planktongemeinschaften in Abhängigkeit von verschiedenen beobachtbaren Stadien.

Verbreitung der Planktongruppen im Pelagial

Seit 1987 werden Untersuchungen zu Vorkommen, Verteilung und Häufigkeiten von Coccolithophoriden durchgeführt, wobei ein größerer Probensatz an über 70 Stationen mit mehr als 200 Proben bearbeitet wurde. Die Ergebnisse können mit Einschränkungen auch auf andere Phytoplankter übertragen werden.

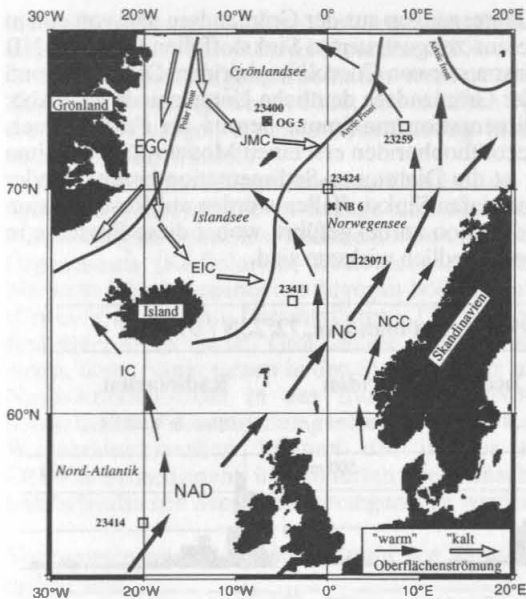


Abb. 20: Geographische Lage der bearbeiteten Stationen und Darstellung der Hauptwassermassen sowie ozeanographischen Fronten im Arbeitsgebiet.

JMC: Jan-Mayen-Strom

EGC: Ostgrönlandstrom

NC: Norwegenstrom

NCC: Norwegischer Küstenstrom

NAD: Nordatlantik-Drift

EIC: Ostislandstrom

Bei den Coccolithoporiden lassen sich im Europäischen Nordmeer drei Artengruppen unterscheiden, deren regionale Verteilung die Oberflächenwassermassen nachzeichnet (43, 44). Die regionalen Gruppen unterliegen einem ausgeprägten Jahresgang, der in großen Unterschieden zwischen Sommer- und Winter/Frühjahr-Halbjahren deutlich wird. Dabei verändern sich die Häufigkeiten einzelner Arten innerhalb der regionalen Gruppen, wobei im Sommerhalbjahr starke Blüten vor allem durch *Emiliania huxleyi* (bis > 3 Mio. Zellen/Liter) hervorgebracht werden. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Beobachtungsjahren, die sowohl Zusammensetzung und Artenanteile der regionalen Gruppen als auch Zeit und Intensität von Produktionsphasen betreffen.

Laufende Untersuchungen an Radiolarien und an Foraminiferen aus der Wassersäule erfolgen an Multinetzproben aus verschiedenen Tiefenintervallen (bis 2000m Wassertiefe). Hierdurch wird die Tiefenzonierung bestimmter Radiolarienarten auskartiert, die bereits durch die Ergebnisse der Sinkstoffallenuntersuchungen als Bewohner größerer Wassertiefen interpretiert wurden.

Partikeltransport durch die Wassersäule und Veränderungen der planktischen Sinkgemeinschaft

Planktonproben sind Momentaufnahmen, die das Vorkommen von Planktonorganismen an einer Position zu einem bestimmten Zeitpunkt wiedergeben. In Proben aus Sinkstoffallen sind diese Momentaufnahmen über einen größeren Zeitraum (meist mehrere Wochen) gemittelt. Sie bilden somit die zeitlichen Variationen in Planktonhäufigkeiten und Zusammensetzung der Gemeinschaften ab und lassen saisonale Muster erkennen. Zudem können Prozesse, die die Sinkgemeinschaft auf dem Weg durch die Wassersäule verändern, durch Sinkstoffallen in unterschiedlichen Wassertiefen studiert werden.

Bisher wurden Diatomeen, Radiolarien und Coccolithoporiden parallel untersucht. Die Ergebnisse werden jetzt durch die zusätzliche Bearbeitung der Foraminiferen ergänzt.

Es wurde das Material von zwei Jahresgängen aus der Grönlandsee und von einem Jahresgang aus der Norwegensee aus zeitgesteuerten Sinkstofffallen (OG 3/5, NB 6) ausgewertet. Die Sedimentationsmuster von Coccolithophoriden, Diatomeen und Radiolarien weisen im Bereich der Grönlandsee deutliche Unterschiede auf (Abb. 21). Diatomeen haben ihr Sedimentationsmaximum bereits im Frühsommer, wohingegen Radiolarien und Coccolithophoriden erst einen Monat später Maxima ausbilden. Zu diesem Zeitpunkt ist die Diatomeen-Sedimentation bereits wieder gering. Die erhöhten Flüsse in den tiefen Sinkstoffallen werden auf Resuspension am Meeresboden und laterale Advektion zurückgeführt, wobei diese Prozesse in den untersuchten Seegebieten unterschiedlich wirksam sind.

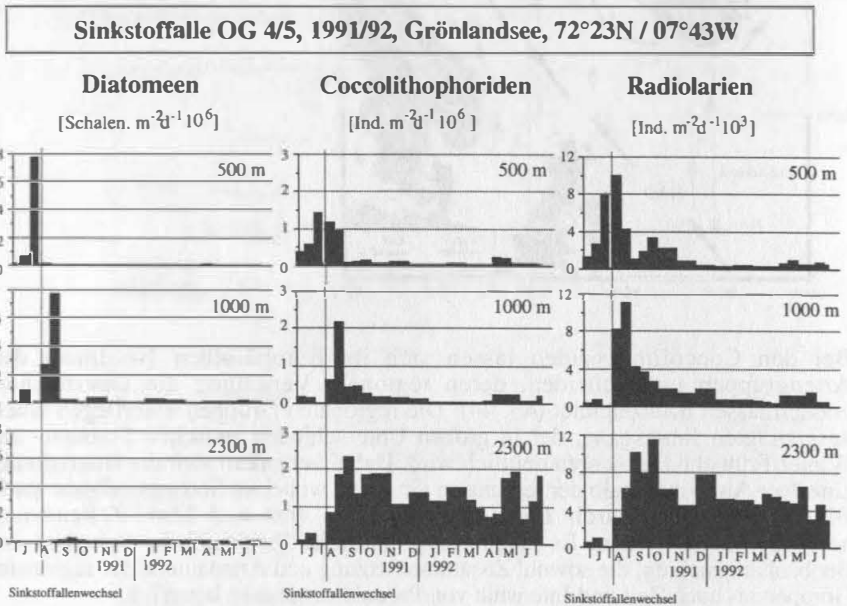


Abb. 21: Absolute Häufigkeiten von Diatomeen, Coccolithophoriden und Radiolarien in den Tiefenstockwerken 500m, 1000m und 2000m in der Sinkstoffallen-Verankerung OG 4/5 (1991/1992).

Die Artengemeinschaften von Radiolarien und Diatomeen unterliegen während des Sedimentationsprozesses drastischen Veränderungen durch Opallösung und durch laterale Advektion/Resuspension. Zum einen werden die in den Sinkstoffallen gemessenen Radiolarien-Flüsse mit zunehmender Tiefe größer, da offensichtlich ein lateraler Eintrag auftritt. Zum anderen nehmen die Flüsse der Diatomeen ab, da sie sehr fragil sind und schneller gelöst werden als die meisten Radiolarien. Für bestimmte Arten konnte eine starke Lösungsanfälligkeit gezeigt werden (23, 50). Schwächer verkieselte Diatomeenarten werden im Verlauf des Absinkens schneller gelöst als stärker verkieselte Arten. Dies zeigt sich in einer deutlichen Abnahme des dünnchaligen *Asteromphalus robustus* und der leicht verkieselten *Rhizosolenia hebetata*. Diese Abnahme ist gekoppelt mit einer relativen Zunahme der stärker verkieselten Arten wie z.B. *Thalassiosira anguste-lineata* (23).

Die Radiolarien zeigen ein grundsätzlich ähnliches Bild, wenn auch die Veränderungen in den Artenvergesellschaftungen weniger ausgeprägt sind (50).

Bei den Radiolarien wurden unterschiedliche Tiefenhabitate einzelner Arten erkannt. So wird in der 1000m Sinkstofffalle ein verstärktes bzw. erstmaliges Vorkommen

der Radiolarienarten *Artostrobos annulatus*, *Cycladophora davisiana*, *Lirella melo* und *Lithostrobos botryocytis* beobachtet (50).

Coccolithophoridengemeinschaften werden hauptsächlich durch mechanische Zerstörung, bedingt durch Fraß, sowie durch laterale Advektion/Resuspension verändert. Dagegen ist chemische Lösung in der Wassersäule vermutlich ein untergeordneter Prozeß.

Der Vergleich der Sinkstoffallen der Grönlandsee mit denen der Norwegensee zeigt deutliche Unterschiede in Menge und Zusammensetzung der sedimentierten Planktonorganismen. Die Sedimentation in der Grönlandsee wird von kieseligen Organismen (Radiolarien, Diatomeen, Silicoflagellaten) dominiert. In der Norwegensee sedimentieren dagegen höhere Anteile karbonatischer Organismen (Coccolithophoriden, Foraminiferen). Die Sinkgemeinschaften der Norwegensee sind diverser als die der Grönlandsee. Alle Planktongruppen enthalten atlantische Arten, deren Vorkommen in den Sinkstoffallen meridionalen Transport durch den Nord-Atlantikstrom in das Europäische Nordmeer dokumentieren. Trotz beträchtlicher Vermischungseffekte durch Lateral-Transport in den tiefen Wasserstockwerken können die in der tiefen Sinkstoffalle und im Oberflächensediment überlieferten Gemeinschaften zur Differenzierung der unterschiedlichen Seegebiete herangezogen werden.

Vorkommen und Zusammensetzung von Fossilgemeinschaften in Oberflächensedimenten

Während Prozesse in der Wassersäule Tage bis Jahre umfassen, bilden Oberflächensedimente meist Jahrzehnte bis Jahrhunderte ab, wie durch die Alter der bearbeiteten Oberflächensedimente deutlich wird, die zwischen rezent und mehr als 2500 Jahren variieren. Trotzdem sind die Planktongemeinschaften der Oberflächensedimente eine wichtige Verbindung zwischen den Planktongemeinschaften der Wassersäule, die durch kurzfristige biologisch und aktuopaläontologische Prozesse verändert werden und den fossilen Planktongemeinschaften der Sedimente, die geologische Zeiträume dokumentieren. Die Plankton- und Sinkstoffallenuntersuchungen zeigen, daß die einzelnen Planktongruppen in ihrem Überlieferungspotential deutlich verschieden sind. Die Vollständigkeit der Überlieferung nimmt dabei von Dinoflagellaten-Zysten über Coccolithophoriden und Foraminiferen zu den Radiolarien und Diatomeen hin ab. Während die kieseligen und kalkigen Gruppen in den Sedimenten auf dem Grönlandschelf, die kieseligen Gruppen teilweise auch im Grönlandbecken nicht überliefert sind, werden Dinoflagellaten-Zysten durchgehend beobachtet.

Die Verteilung von Dinoflagellaten-Zysten und Coccolithophoriden-Gemeinschaften in Oberflächensedimenten bildet die Verbreitung der Oberflächenwassermassen im Europäischen Nordmeer ab (26, 27). Größere Häufigkeiten, gleichzeitig verbunden mit hohen Diversitäten, finden sich besonders im Einflußbereich des atlantisch geprägten Norwegenstromes. Nach Nordwesten, mit Annäherung an die kalten, polar beeinflussten Wassermassen, ist generell eine Abnahme der Häufigkeiten zu beobachten. Mit Hilfe von Faktoren- und Cluster-Analyse wurden für die Dinoflagellaten-Zysten vier Gemeinschaften definiert, deren Verbreitung mit der Ausdehnung der polaren, arktischen und atlantischen Wassermassen sowie der Wassermasse auf dem Isländischen Schelf korreliert ist (27).

Entwicklung der Planktongemeinschaften im Jungquartär

Die Entwicklung der Planktonvergesellschaftungen von Coccolithophoriden, Diatomeen, Dinoflagellaten-Zysten und Radiolarien wurde in fünf spätpleistozänen/holozänen Sedimentkernen untersucht. Dem aktuopaläontologischen Ansatz dieses Teilprojektes folgend, wurden die aus den Wassersäulenuntersuchungen gewonnenen Ergebnisse in die Interpretation der

fossilen Gemeinschaften einbezogen. Ein identischer Probensatz wurde benutzt, um die zeitliche und räumliche Verteilung jeder Gruppe zu analysieren und die Veränderungen der Gemeinschaften in ihrer Abhängigkeit von den Änderungen der Umwelt seit dem Spätglazial zu charakterisieren.

Die präzise zeitliche Einstufung der holozänen Sedimentkerne erfolgte mit Hilfe von Sauerstoffisotopen, die jeweils durch 3 bis 4 AMS ^{14}C -Alter in eine absolute Zeitskala eingehängt wurden.

Die absoluten Häufigkeiten der vier Planktongruppen weisen in den Kernen aus dem Europäischen Nordmeer (z. B. 23411 und 23259) mit Ausnahme der Grönlandsee (23400) prinzipiell übereinstimmende Verteilungsmuster auf. Allgemein ist eine Zunahme der Individuenzahlen seit dem Beginn des Holozäns (ca. 10.000 J.v.h.) zu beobachten (Abb. 22). Während jedoch bei den Diatomeen und den Radiolarien schon im frühesten Holozän Maxima ausgebildet sind, nehmen die Häufigkeiten von Dinoflagellaten-Zysten und Coccolithophoriden erst im späteren Holozän deutlich zu. Im Gegensatz zu den Sedimenten, die im Einflußbereich der warmen Nordatlantischen Wassermassen abgelagert werden, zeigen die Sedimente aus der Grönlandsee sehr geringe Anteile biogenen Materials, und kieselige Planktonorganismen treten nur sporadisch auf. Hier wird der Einfluß geologischer Prozesse auf die Ausbildung von Sedimentgemeinschaften besonders deutlich: trotz hoher Sedimentationraten von kieseligen Biogenen (vergl. oben) erfolgt aufgrund von verstärkter Lösung keine Überlieferung (23, 50).

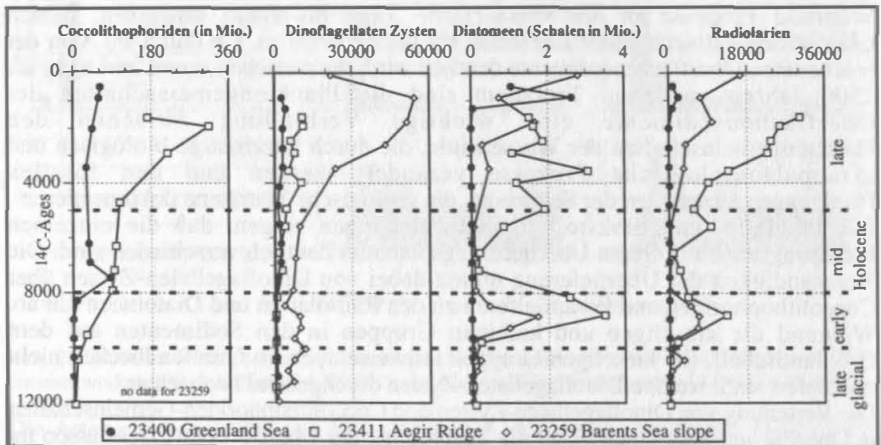


Abb. 22: Absolute Häufigkeiten von Coccolithophoriden, Dinoflagellaten-Zysten, Diatomeen und Radiolarien in den Sedimentkernen 23400, 23411 und 23259.

Auch in den Kernen aus dem Einflußbereich der warmen nordatlantischen Wassermassen tritt im mittleren Holozän ein Intervall mit geringen Häufigkeiten kieseliger Planktonorganismen auf. In diesem Intervall sind die Individuen zumeist sehr schlecht erhalten, wobei lösungsresistentere Arten die Gemeinschaften der Diatomeen und Radiolarien in diesem Abschnitt dominieren (23, 50). Zurückgeführt wird dieses Phänomen auf einen primären Rückgang der kieseligen Sedimentation nach dem Frühholozänen Maximum, wodurch die Lösung der kieseligen Biogene im Sediment noch verstärkt wird. Die jüngsten Sedimente waren der Porenwasseraktivität entsprechend kürzer ausgesetzt, sodaß die kieseligen Plankter erneut besser erhalten sind (50). Es wird vermutet, daß Änderungen in der

Bioturbation ebenfalls auf die Erhaltung der kieseligen Organismen Einfluß nehmen.

Während die Dinoflagellaten-Zysten- und die Coccolithophoriden-Gemeinschaften in allen Sedimenten von sehr wenigen Arten dominiert werden, sind die kieseligen Gemeinschaften durch ein breites Artenspektrum ohne stark ausgeprägte Dominanzen gekennzeichnet. Trotzdem lassen sich synchrone Veränderungen in der Artenzusammensetzung aller Gruppen erkennen, mit deren Hilfe die Entwicklung der Gemeinschaften im Spätpleistozän und Holozän in drei Abschnitte unterteilt wird.

Die Berücksichtigung mehrerer Gruppen, für die verschiedene ökologische Faktoren von unterschiedlicher Bedeutung sind und deren Sedimentation unterschiedlichen Einflüssen unterliegt, führt zu einem räumlich-zeitlich differenzierten Bild der palökologischen Verhältnisse. Hierdurch wird die komplexe Kopplung von (Paläo-) Lebensgemeinschaften mit (Paläo-) Lebensbedingungen sowie mit den verändernden Prozessen während der Sedimentation besser wiedergeben, als dies durch die Bearbeitung nur einzelner Gruppen möglich ist. Die Bedeutung des synoptischen Ansatzes wird am folgenden Beispiel deutlich:

Auf dem Aegir-Rücken (23411) (Abb. 20) zeigen sowohl *Thalassiosira antarctica* (Diatomee) und *Amphimelissa setosa* (Radiolarie) als auch *Impagidinium pallidum* (Dinoflagellaten-Zyste) und *Coccolithus pelagicus* (Coccolithophoride) einen, im Vergleich zum Vøring-Plateau, größeren Einfluß arktischer Wassermassen an. Alle vier Arten werden als kalt-temperate bzw. als polare Formen charakterisiert. Allerdings sind diese Arten in ihren Häufigkeitsverläufen deutlich verschieden. Ähnliche (kalt-temperate bis polare) Bedingungen müßten demnach für unterschiedliche Zeitintervalle angenommen werden, wenn jede Planktongruppe für sich allein betrachtet wird. Während *A. setosa* im gesamten Holozän relativ hohe Anteile zeigt, lassen sowohl *I. pallidum* als auch *C. pelagicus* auf eine starke südöstliche Ausdehnung arktischer Wassermassen im frühen Holozän schließen. Dagegen werden große Häufigkeiten von *T. antarctica* erst in den jüngsten Sedimenten beobachtet. Möglicherweise sind die unterschiedlichen Häufigkeitsverläufe als Reaktion dieser Arten auf verschiedene ökologische Faktoren zu verstehen. Dies bedeutet, daß die Bezeichnung als kalt-temperate Art nur eine ungenügende Charakterisierung der tatsächlichen, für die jeweilige Art sehr viel komplexeren Präferenzen darstellt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, daß zusätzliche Faktoren wie Opallösung im Sediment die Häufigkeiten einzelner Arten beeinflussen.

Die bisherigen Arbeiten im Teilprojekt B 3 zeigen, daß für die Beurteilung der fossilen Planktongemeinschaften der Rahmen der Untersuchungen erweitert werden muß. Die ursprünglichen Planktongemeinschaften unterliegen auf ihrem Weg zur Fossilgemeinschaft zahlreichen Prozessen in der Wassersäule, auf der Sedimentoberfläche und im Sediment. Zwar wird die Deutbarkeit durch die synoptische Bearbeitung der verschiedenen Gruppen teilweise kompensiert, trotzdem wird sich das Teilprojekt in Zukunft besonders mit Prozessen der Lösung, der lateralen Advektion sowie vor allem der synoptischen Zusammenschau aller Planktongruppen über den deskriptiven Ansatz hinaus beschäftigen, um die Deutbarkeit der Sedimentgemeinschaften zu verbessern.

2.8 Numerische Modelle von Paläoklima, Paläoozeanographie und Sedimentation

Das Teilprojekt B4 hat die Modellierung der Zirkulation und Sedimentation während der letzten 350.000 Jahre im nördlichen Nordatlantik zum Ziel.

Die Veränderungen der Zirkulation und der Wassermassenverteilungen werden im Ozean — und im Modell — durch Variationen im Antrieb, d. h. der solaren Einstrahlung, des Niederschlags, der Verdunstung oder des Winds hervorgerufen. Aus sedimentologischen, stratigraphischen, mikropaläontologischen, Kohlenstoff-, Sauerstoff-Isotopen- sowie geophysikalischen Untersuchungen liegen mittlerweile eine Vielzahl von Proxy-Daten und Informationen über das Sedimentationsgeschehen vor. Abgeleitet aus diesen Daten existieren für bestimmte Zeitscheiben mehr oder weniger präzise, zum Teil aber auch strittige Vorstellungen bezüglich der Temperaturen und Salzgehalte, der Eisbedeckung und der Zirkulation des Ozeans. Die aus den geologisch-geophysikalischen Daten gewonnenen oberflächennahen Temperaturen lassen sich nun, stellvertretend für die in der Natur gegebene Ein- und Ausstrahlung, dem Modell als Oberflächenrandbedingung — also als Antrieb — vorgeben. Das gleiche gilt für die Salzgehalte, die ein Maß für den Frischwasserfluß durch Niederschlag und Verdunstung darstellen. Atmosphärische Modelle (z. B. die des MPI für Meteorologie in Hamburg) liefern Anhaltspunkte über die Windverhältnisse vergangener Zeiten. So ist es möglich, mit Ozeanmodellen die Auswirkung der Antriebsfelder bestimmter Zeitscheiben auf den Ozean zu studieren und typische Muster der Zirkulation und Sedimentation zu gewinnen. Über den Vergleich dieser Muster mit den existierenden, aus Proxy- und Sedimentdaten abgeleiteten Paläo-Zirkulations- und Sedimentationsschemata können Modelle helfen, z. B. die Konsistenz der Interpretationen von $\delta^{18}\text{O}$ hinsichtlich der Temperatur zu testen und eventuell vorhandene Widersprüche aufzuklären.

Zur Modellierung der Ozeanographie dient das allgemeine dreidimensionale ozeanische Zirkulationsmodell SCINNA (Sensitivity and Circulation of the Northern North Atlantic), das die Nachfolgeversion des Princeton-Modellcodes, das Modular Ocean Model, an den Nördlichen Nordatlantik adaptiert. SCINNA umfaßt das Polarmeer, das Europäische Nordmeer, die Barents- und Nordsee sowie den nordöstlichen Atlantik. Die horizontale Auflösung von 55 km erlaubt mit 17 Schichten in der Vertikalen, deren Mächtigkeiten von 50 m an der Oberfläche auf 1000 m am Boden zunehmen, eine realistische Wiedergabe der Topographie. Das Modell wird durch die Vorgabe der Oberflächentemperaturen und -salzgehalte sowie der Windschubspannung angetrieben.

Die Sedimentationsdynamik im nördlichen Nordatlantik wird mit den beiden neu entwickelten numerischen dreidimensionalen Modellen SENNA (SEdimentation (Erosion, Transport and Deposition) in the Northern North Atlantic) und PATRINNA (PArTicle Tracing In the Northern North Atlantic) untersucht (18, 19, 20).

Die Grundzusammenhänge der Sedimentbewegung werden in erster Linie von den rein mechanischen Vorgängen bestimmt. Diese sind gegenüber den biologischen Faktoren aus einer Vielzahl von Beobachtungen und Experimenten bekannt. Dadurch ist eine Parametrisierung der kritischen Geschwindigkeiten für den Beginn des Boden- und Suspensionstransports möglich, mit der in Abhängigkeit von den

aus SCINNA vorgegebenen Geschwindigkeiten der Sedimenttransport bestimmt wird. Mit vorgegebenen Sedimentquellen wird dem Modellozean in den oberen 50 Metern Sediment zugeführt, welches dann mit der Zirkulation transportiert wird. In der zusätzlichen Bodenschicht wird das Sediment unter Berücksichtigung der Bodenneigung erodiert, *umgelagert* und deponiert, wobei die Bodengeschwindigkeiten aufgrund der Berücksichtigung der Bodenreibung reduziert werden (55, 64, 65).

Die Modellexperimente befaßten sich 1994 insbesondere mit der Zeit der letzten Maximalvereisung vor 21600 Jahren (49). Als Grundlage dafür dienten die aus der unterschiedlichen Verbreitung verschiedener fossiler planktischer Foraminiferenarten für den Sommer der letzten Maximalvereisung rekonstruierten Meeresoberflächentemperaturen (11, 53) sowie die an den Karbonatschalen dieser Foraminiferen gemessenen Sauerstoffisotopenverhältnisse (22, 47). Dieses Isotopenverhältnis hängt ab von der Temperatur, bei der die Foraminifere ihre Schale aufbaut und dem Isotopenverhältnis des sie umgebenden Wassers (14, 53). Im heutigen Ozean ist darüber hinaus das Wasser-Isotopenverhältnis linear mit dem Salzgehalt des Meerwassers korreliert (15). Das Verhältnis beider Größen zueinander beträgt dabei in etwa 1:2.

Falls sich nun auch für frühere Zeiten eine solche Beziehung zwischen Salzgehalt und Wasserisotopen aufstellen läßt, kann der damals vorliegende Salzgehalt im Prinzip aus den an Sedimentkernen bestimmten Paläotemperaturen und -isotopenverhältnissen abgeleitet werden. Zur Festlegung dieser Paläo-Relation ist eine neue Methode entwickelt worden. Sie basiert auf der Annahme, daß Salzgehalt und Isotopenverhältnis auch früher in einer linearen Beziehung zueinander standen, die durch zwei Fixpunkte festgelegt wird: einerseits durch die typischen Mittelwerte von Salzgehalt und Isotopenverhältnis im oberflächennahen Nordatlantik, andererseits durch das Isotopenverhältnis von Fluß-, Regen- Schmelzwasser. Hinsichtlich des zweiten Fixpunktes besteht ein beträchtlicher Spielraum bei der Wahl seiner Werte, außerdem sind die nach dieser Methode abgeleiteten Paläotemperaturen und -salzgehalte mit Fehlern bis zu ca. 1°C bzw. 1‰ behaftet, so daß die Rekonstruktionen nicht anhand herkömmlicher Fehlerabschätzungen verglichen und bewertet werden können. An dieser Stelle setzt nun die Modellierung an, mit dem Ziel, aus den verschiedenen *möglichen* Temperatur- und Salzgehaltsverteilungen diejenigen herauszufiltern, die miteinander und mit der resultierenden Zirkulation *physikalisch konsistent* sind.

Abbildung 23 zeigt die für den eiszeitlichen Sommer rekonstruierte Oberflächen-temperatur des nordöstlichen Nordatlantiks, deren großräumige Charakteristika der rezenten Situation im wesentlichen entsprechen. Es ergibt sich ein eisfreies Europäisches Nordmeer mit deutlichen Anzeichen für einen dem heutigen äquivalenten Einstrom über die Island-Schottland-Schwelle sowie einen Ausstrom durch die Dänemarkstraße zwischen Island und Grönland. Im Unterschied zu den heutigen Gegebenheiten weist dieses Temperaturfeld südlich Islands eine weite, nahezu isotherme Region mit Temperaturen um 4–5°C auf. Zahlreiche Modellexperimente mit verschiedenen Annahmen bezüglich des zweiten oben erläuterten Fixpunktes haben ergeben, daß sich nur dann eine mit diesem Temperaturfeld konsistente Salzgehaltsverteilung ergibt, wenn für die Beziehung zwischen Salzgehalt und Wasser-Isotopenverhältnis anstelle des heutigen Verhältnisses (1:2) eine Relation von nahezu 1:1 angesetzt wird.

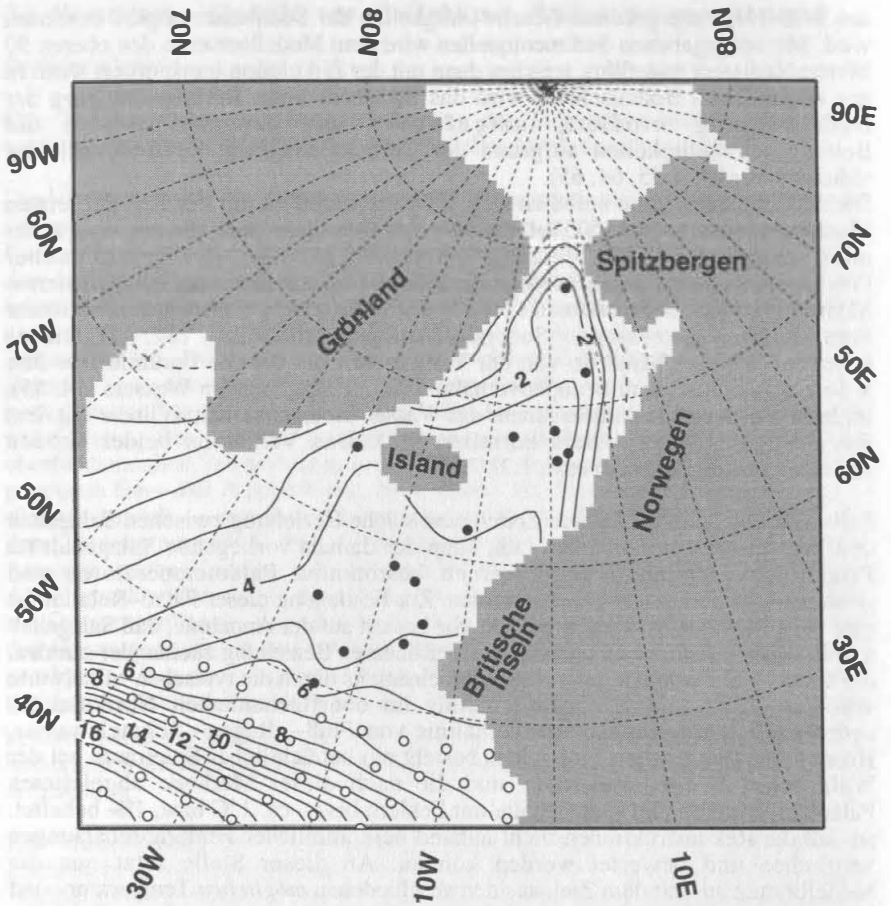


Abb. 23: Meeresoberflächentemperaturen im Sommer der letzten Maximalvereisung, (°C). Schwarze Punkte: Positionen der bearbeiteten Sedimentkerne (52), weiße Punkte: aus dem CLIMAP-Datensatz (11) interpolierte Werte. Aufgrund der Erniedrigung des Meeresspiegels um 100 m vor 21600 Jahren und der Vereisung der Schelfe ist die Küstenlinie gegenüber ihrer heutigen Gestalt verändert (52).

Diese Annahme wird u. a. auch durch die Befunde der grönländischen Eistiefbohrungen (14) gestützt. Damit ergeben sich auch bei den eiszeitlichen Salzgehalten (Abb. 24) einige Übereinstimmungen mit der heutigen Situation: Im zentralen Europäischen Nordmeer liegen Werte bis 35.6‰ vor, die sich zu den Rändern hin auf etwa 35.2–35.3‰ verringern. Ein auffälliger Gegensatz zu heute besteht dagegen in den relativ niedrigen Salzgehalten bis unterhalb von 35.2‰ vor den Britischen Inseln und in der Biskaya.

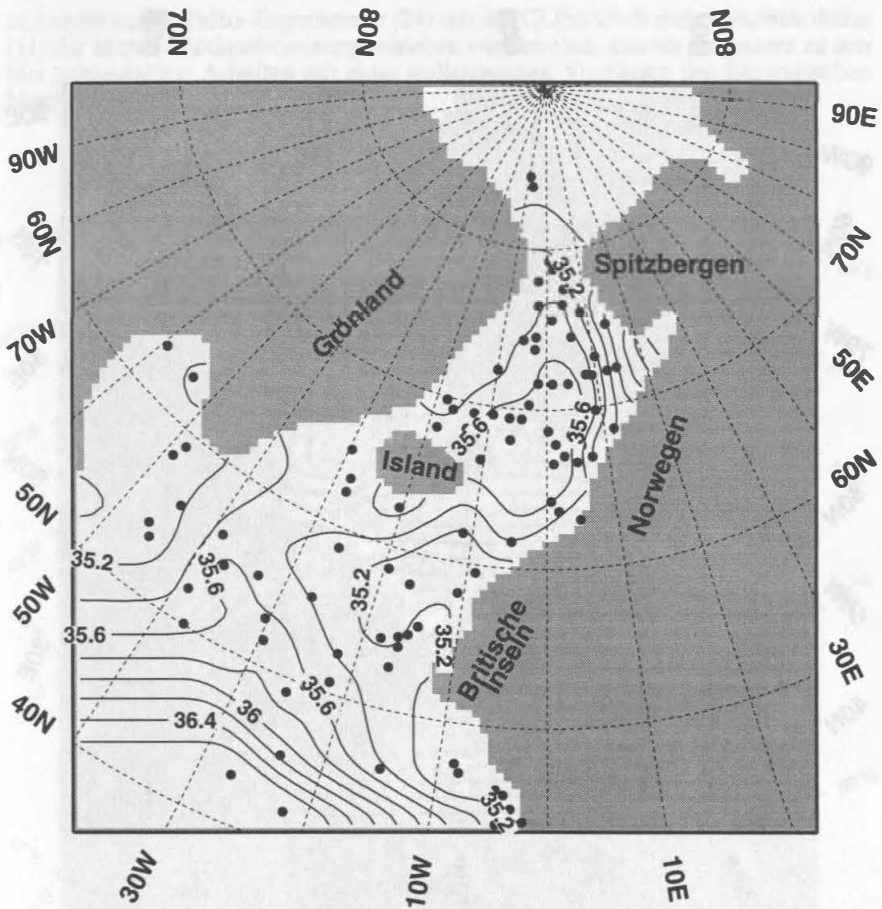


Abb. 24: Oberflächensalzgehalte in ‰ im Sommer der letzten Maximalvereisung, berechnet mit einer Relation von 1:1 zwischen Salzgehalt und Wasser-Isotopenverhältnis. Die Punkte kennzeichnen die Lage der verwendeten Sedimentkerne mit Messungen der Sauerstoffisotopen an Foraminiferenschalen.

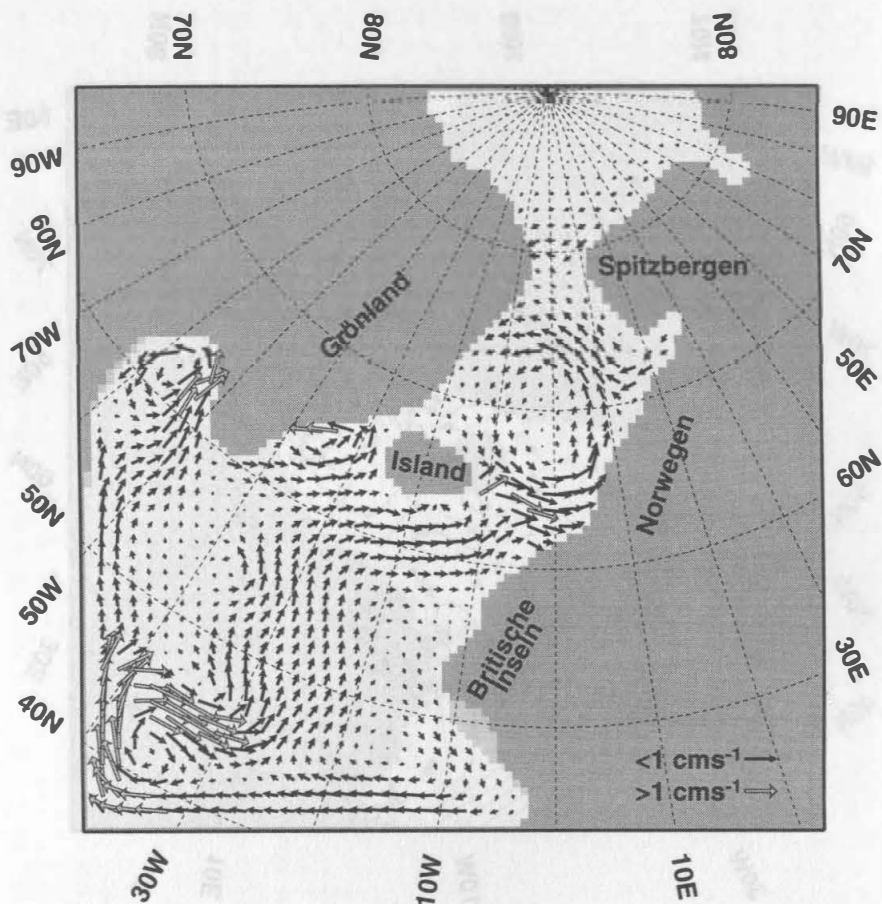


Abb. 25: Die mit SCINNA modellierte oberflächennahe Zirkulation, die sich beim Antrieb des Modells mit den in Abb. 23 und 24 gezeigten Temperatur- und Salzgehaltsfeldern bei einer Rechnung ohne Windantrieb ergibt. Dargestellt ist jeder zweite Geschwindigkeitsvektor aus der zweiten Modellschicht (50–100 m Tiefe).

Die Modellrechnungen zeigen (Abb. 25), daß auch während der letzten Hochvereisung ein dem heutigen entsprechendes Stromsystem vorgelegen haben muß, so wie es sich an den rekonstruierten Temperaturen angedeutet hat. Im Unterschied zu heute ist jedoch der Nordatlantische Strom nach Westen verlagert, er biegt entsprechend der fast isothermen Region erst südlich Islands ins Europäische Nordmeer ab. Allerdings ist dieses Szenario im Bereich Ostgrönlands und der Dänemarkstraße noch unsicher, denn dort liegen bisher keine ausreichenden Temperaturrekonstruktionen an Sedimentkernen vor. Auch zum Windfeld kann zur Zeit nur wenig gesagt werden, da die bisher gerechneten

atmosphärischen Paläo-Experimente (24) mit der CLIMAP-Sommerrekonstruktion (11) der letzten Maximalvereisung betrieben worden sind, also im Gegensatz zu den hier vorgestellten Arbeiten mit einer vollständigen Vereisung des Europäischen Nordmeers.

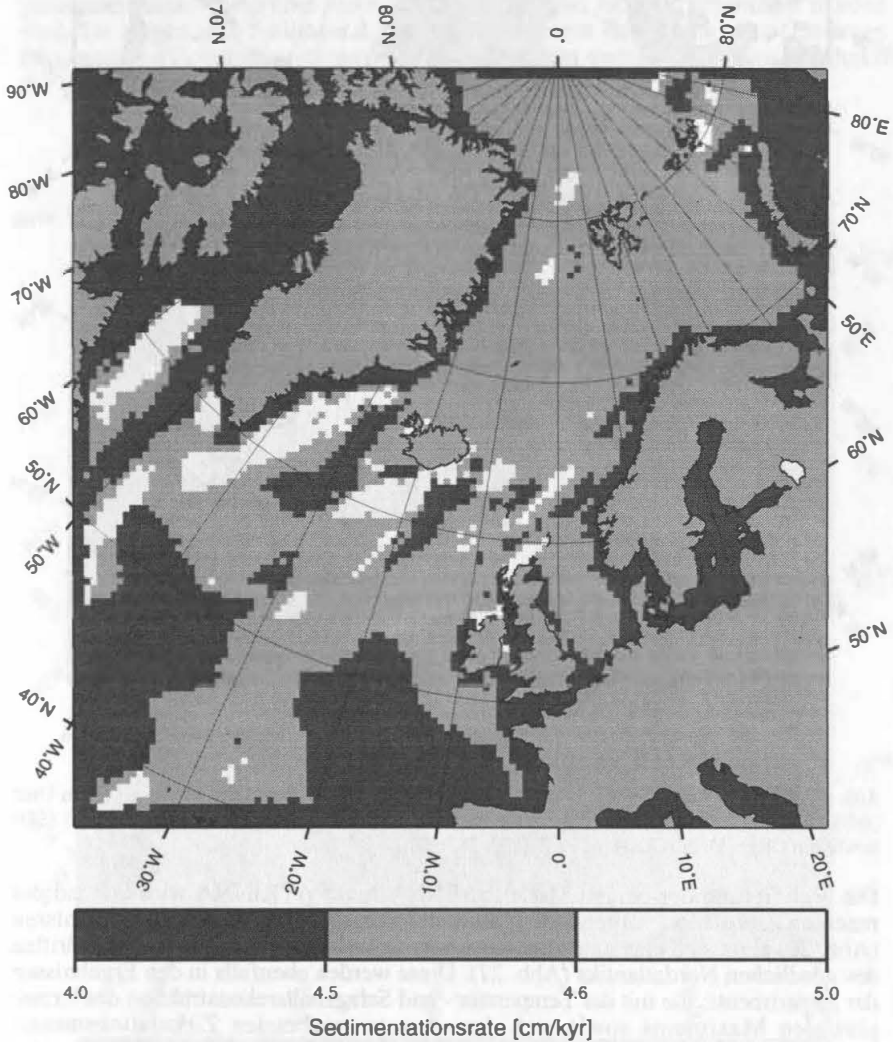


Abb. 26: Die rezente mit SENNA modellierte Änderung der Bodentopographie in cm/1.000 Jahre: Im Vergleich mit der Abb. 27 zeigt sich eine gute Übereinstimmung in der Lage der Driftgebiete (18, 19, 20).

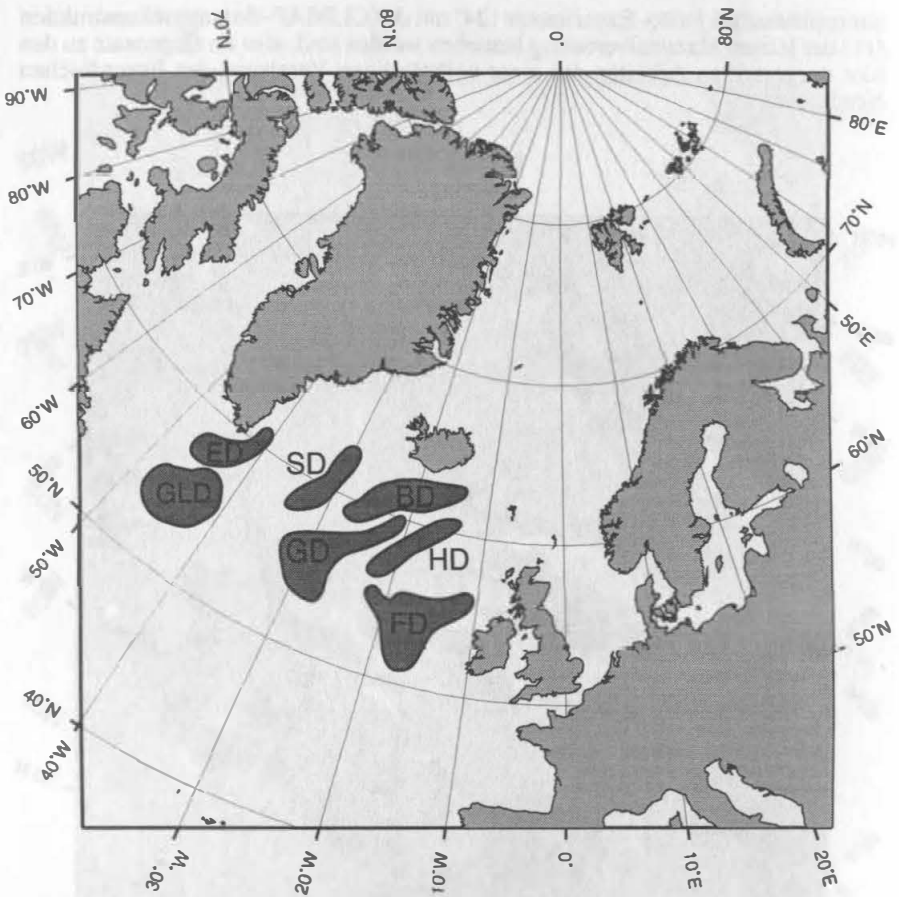


Abb. 27: Die Hauptsedimentdriften im nördlichen Nordatlantik: Feni Drift (FD), die Bjorn Drift (BD), die Hatton Drift (HD), die Gadar Drift (GD), die Snorri Drift (SD), die Eirik Drift (ED) sowie die Gloria Drift (GLD) (6, 18, 19, 20, 28, 63).

Die Validierung der beiden Modelle SENNA und PATRINNA wird anhand der rezenten Zirkulation vorgenommen. In den mit SENNA modellierten Ergebnissen (Abb. 26) zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den bekannten Sedimentdriften des nördlichen Nordatlantiks (Abb. 27). Diese werden ebenfalls in den Ergebnissen der Experimente, die mit der Temperatur- und Salzgehaltsrekonstruktion des letzten glazialen Maximums sowie sich dem daraus ergebenden Zirkulationsmuster initialisiert und durchgeführt worden sind, bestätigt. Die Kongruenz zwischen der rezenten Zeitscheibe und der der letzten Maximalvereisung ist von entscheidender Bedeutung (Abb. 28), weil sie den Beweis erbringt, daß die Nachbildung der über

viele Millionen Jahre entstandenen Hauptsedimentdriften möglich ist. Gleichwohl die Zirkulationsschemata unterschiedlich sind, verstärkt sich die Sedimentation in bestimmten Regionen, was auch die mit PATRINNA modellierten Trajektorien einzelner Sedimentpartikel verdeutlichen. Abbildung 29 zeigt 495 Sedimentpartikel, die in der Bodenschicht gestartet — der Startpunkt ist durch einen Punkt gekennzeichnet — und über einen Zeitraum von zehn Jahren transportiert worden sind. Sie zeigen, daß Sedimentablagerungen in einem Bereich aus verschiedenen Regionen und Zeiträumen stammen können. Bestätigt werden die Ergebnisse durch die Transportberechnungen an ausgewählten Querschnitten und Meeresengen.

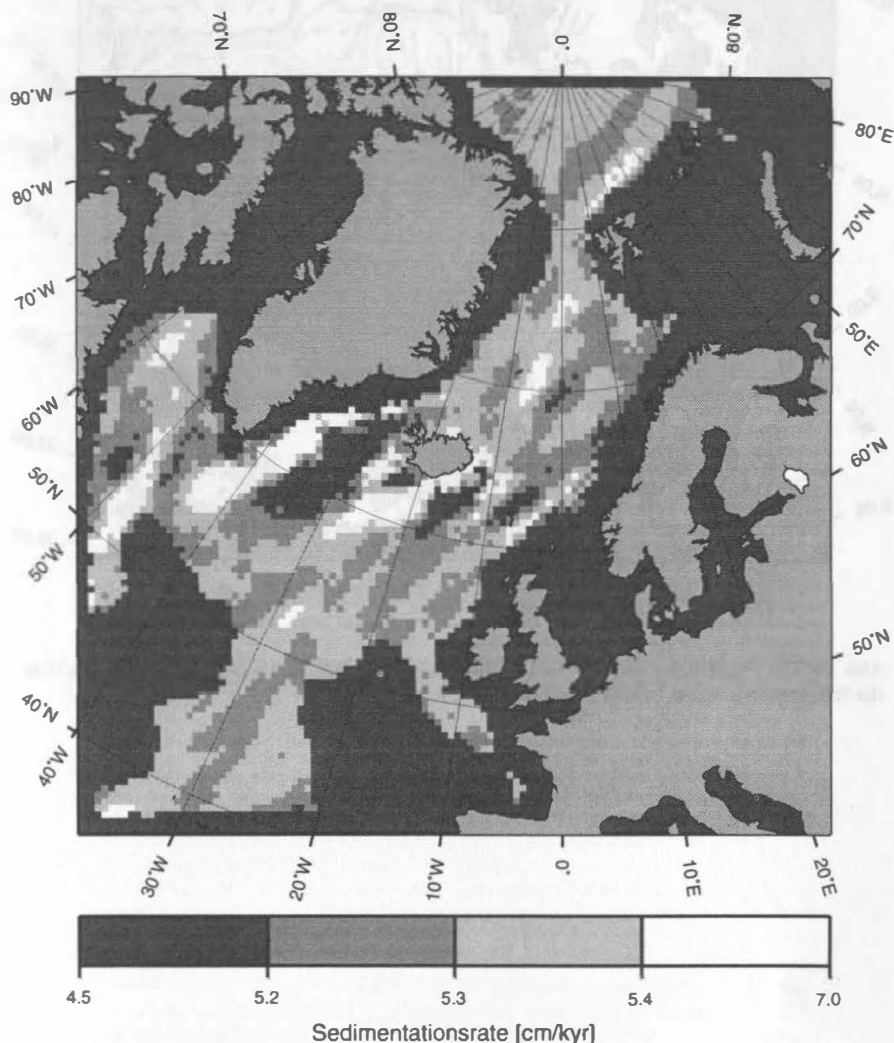


Abb. 28: Überlagerung der rezenten modellierten Änderung der heutigen Bodentopographie sowie der Bodentopographieänderung des Letzten Glazialen Maximums in cm/1.000 Jahre: Im Vergleich mit der Abb. 26 und 27 zeigen sich Gemeinsamkeiten in der Lage der Driftgebiete (18, 19, 20).

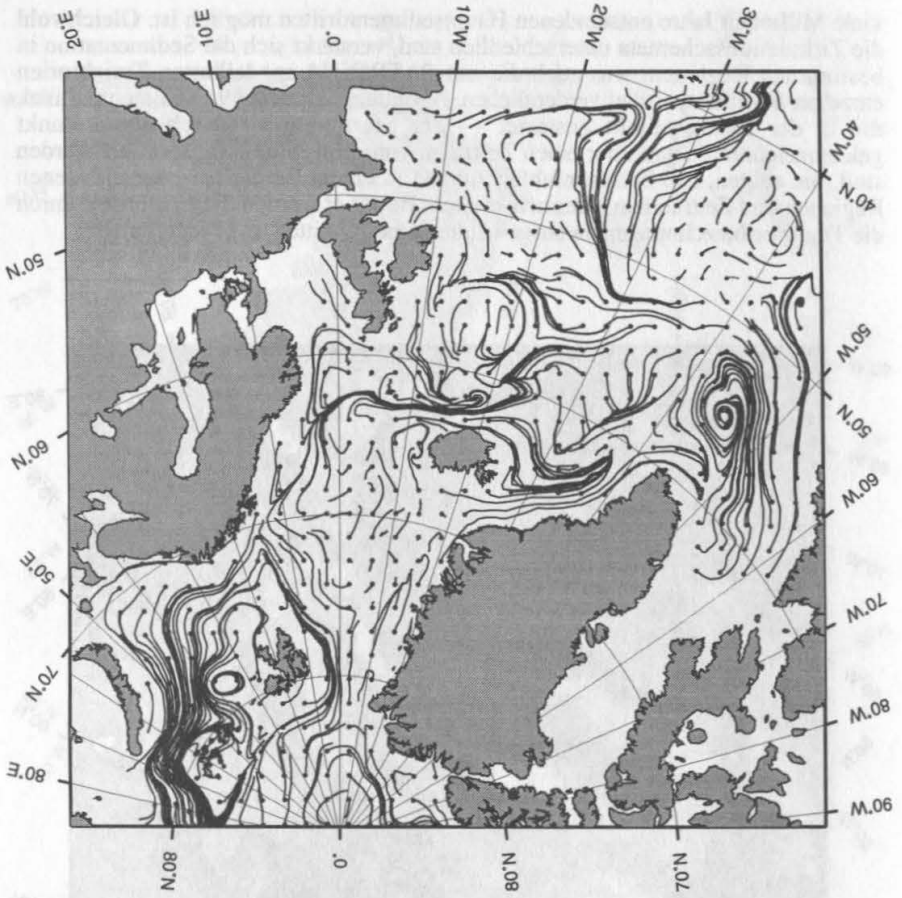


Abb. 29: Die Trajektorien von 495 Sedimentpartikeln in der ein Zentimeter dicken Bodenschicht: der Integrationszeitraum beträgt zehn Jahre (18, 19, 20).

3. Am SFB beteiligte Institutionen:

Forschungszentrum für marine Geowissenschaften (GEOMAR)

Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum (GPI)

Institut für Angewandte Physik (IAP)

Institut für Geophysik (IG)

Institut für Kernphysik (IfK)

Institut für Meereskunde (IfM)

Institut für Polarökologie (IPÖ)

BIBLIOGRAPHIE

- BAUCH, H., Planktische Foraminiferen im Europäischen Nordmeer - ihre Bedeutung für die paläo-ozeanographische Interpretation während der letzten 600.000 Jahre. Ber. Sonderforschungsbereich 313, 40: p. 108 (1993).
- 2 BAUERFEIND, E., v. BODUNGEN, B., ARNDT, K., KOEVE, W., Particle flux, and composition of sedimenting matter, in the Greenland Sea. J. Mar. Syst., 5: 411-423 (1994).
 - 3 BLAUME, F., Hochakkumulationsgebiete am Norwegischen Kontinentalhang: Sedimentologische Abbilder Topographie-geführter Strömungsmuster. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 36: p. 150 (1992).
 - 4 BLUMER, M., GUILLARD, R. R. L., CHASE, T. Hydrocarbons of marine phytoplankton. Mar. Biol., 8: 183-189 (1971).
 - 5 v. BODUNGEN, B., ANTIA, A., BAUERFEIND, E., HAUPT, O., KOEVE, W., MACHADO, E., PEEKEN, I., PEINERT, R., REITMEYER, S., THOMSEN, C., VOSS, M., WUNSCH, M., ZELLER, U., ZEITZSCHEL, B., Pelagic processes and vertical flux of particles: an overview of a long-term comparative study in the Norwegian Sea and Greenland Sea. Geol. Rundschau, 84: 11-27 (1995).
 - 6 BOHRMANN, G., HENRICH, R., THIEDE, J., Miocene to Quaternary Paleooceanography in the Northern North Atlantic: Variability in Carbonate and Biogenic Opal Accumulation, Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic. Hrsg. Bleil U., Thiede, J., Kluwer Academic Publishers, Netherland: 647-675 (1990).
 - 7 BRANDT, A., Composition, abundance, and diversity of peracarid crustaceans on a transect of the Kolbeinsey Ridge, north of Iceland. Polar Biology, 13: 565-576 (1993).
 - 8 BRANDT, A., PIEPENBURG, D., Peracarid crustaceans assemblages of the Kolbeinsey Ridge, north of Iceland. Polar Biology, 14: 97-105 (1994).
 - 9 BRASSEL, S. C., WARDROPER, A. M. K., THOMSON, I. D., MAXWELL, J. R., EGLINGTON, G., Specific acyclic isoprenoids as biological markers of methanogenic bacteria in marine sediments. Nature 290: 693-696 (1981).
 - 10 BRYAN, K., A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean, J. Comp. Phys., 4: 347-376 (1969).
 - 11 CLIMAP PROJECT MEMBERS, Seasonal Reconstructions of the Earth's Surface at the Last Glacial Maximum, GSA Map and Chart Ser., MC-36, Geol. Soc. Am., Boulder, Colo. (1981).
 - 12 COX, M. D., A Primitive Equation, 3-Dimensional Model of the Ocean, GFDL Ocean Group Technical Report No. 1, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA, Princeton University: p. 104 (1984).
 - 13 DANSGAARD, W., OESCHGER, H., Past Environmental Long-Term Records from the Arctic, in The Environmental Record in Glaciers and Ice Sheets. Hrsg. Oeschger, H., Langway C. C., Jr., Wiley, New York: 287-318 (1989).
 - 14 EPSTEIN, S., BUCHSBAUM, R., LOWENSTAM, H. A., UREY, H. C., Revised Carbonate-Water Isotopic Temperature Scale, Geol. Soc. Am. Bull., 64: 1315-1325 (1953).
 - 15 GEOSECS, Atlantic, Pacific, and Indian Ocean Expeditions: Shorebased Data and Graphics, in GEOSECS Executive Committee. Hrsg. Östlund, H. G., Craig, H., Broecker, W. S., Spencer, D., I.D.O.E., National Science Foundation, 7 (1987).
 - 16 GRAF, G., Benthic-pelagic coupling in a deep-sea benthic community. Nature, 341: 437-439 (1989).
 - 17 GRAF, G., Benthic-pelagic coupling: A benthic view. Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev., 30: 149-190 (1992).
 - 18 HAUPT, B. J., Numerische Modellierung der Sedimentation im nördlichen Nordatlantik. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 52: p. 129 (1995).
 - 19 HAUPT, B. J., SCHÄFER-NETH, CHR., STATTEGGER, K., 3-D Numerical Modelling of Late Quaternary Paleooceanography and Sedimentation in the Northern North Atlantic, Geologische Rundschau, 84: 137-150 (1995).
 - 20 HAUPT, B. J., SCHÄFER-NETH, CHR., STATTEGGER, K., Modelling Sediment Drifts; A Coupled Oceanic Circulation-Sedimentation Model of the Northern North Atlantic. Paleooceanography, 9/6: 897-916 (1994).

- 21 JENSEN, P., RUMOHR, J., GRAF, G., Sedimentological and biological differences across a deep-sea ridge exposed to advection and accumulation of fine-grained particles. *Oceanologica Acta*, 15: 287-296 (1992).
- 22 KELLOGG, T. B., DUPLESSY, J.-C., SHACKLETON, N., Planctonic Foraminiferal and Oxygen Isotopic Stratigraphy and Paleoclimatology of Norwegian Deep-Sea Cores. *Boreas*, 7: 61-73 (1978).
- 23 KOHLY, A., Aktuopaläontologische Untersuchungen zu Verbreitung und Vertikalfluß von Diatomeen sowie ihre räumliche und zeitliche Entwicklung im Jungquartär des Europäischen Nordmeeres. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ Kiel, 49: p. 118 (1994).
- 24 LAUTENSCHLAGER, M., Simulation of the Ice Age Atmosphere — January and July Means. *Geologische Rundschau*, 80/3: 513-534 (1991).
- 25 MAASSEN, J., Stoffflüsse organischer Markerverbindungen am westlichen Barents See Kontinentalhang: Korrelation mit Transportprozessen. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 45: p. 129 (1995).
- 26 MATTHIESSEN, J., Distribution patterns of dinoflagellate cysts and other organic-walled microfossils in recent Norwegian-Greenland Sea sediments. *Mar Micropaleontol*, 24: 307-334 (1995).
- 27 MATTHIESSEN, J., Verbreitung von marine Palynomorphen Vergesellschaftungen in rezenten Sedimenten des Europäischen Nordmeeres. *N. Jb. Geol Paläontol, Abh.* 194 (1): p. 24 (1994).
- 28 MCCAVE, I. N., TUCHOLKE, B. E., Deep Current Controlled Sedimentation in the Western North Atlantic, *The Geology of North America*. Hrsg. Vogt, P. R., Tucholke, B. E., Geological Society of America, Boulder, Colorado, M: 451-468 (1986).
- 29 MIENERT, J., CHI, J., Astronomic timescale for physical property records of Quaternary sediments from the northern North Atlantic. *Geologische Rundschau*, Vol. 84, 1: 67-88 (1995).
- 30 MIENERT, J., KENYON, N. H., THIEDE, J., HOLLENDER, F. J., Polar continental margins: Studies off East Greenland. *Eos, AGU*, v.74, No. 20: 225-236 (1993).
- 31 MIENERT, J., FLOOD, R. D., DULLO, W. CHR., Research perspectives of sediment waves and drifts: Monitors of global change in deepwater circulation. In: *Sediment waves and drifts: Monitors of global change in deepwater circulation* (ed. J. Mienert). *Paleoceanography*, Vol. 9, 6: 893-895 (1994).
- 32 MYSAK, L. A., MANAK, D. K., MARSDEN, R. F., Sea-ice anomalies observed in the Greenland and Labrador Seas during 1901-1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle. *Climate Dynamics*, 5: 111-133 (1990).
- 33 NIEBAUER, H. J., Bio-physical oceanographic interactions at the edge of the Arctic ice pack. *J. Mar. Syst.*, 2: 209-232 (1991).
- 34 OSTEROTH, C., PETRICK, G., WENCK, A., Seasonal variations of particulate matter from the Baltic Sea. *Mar. Chem.*, 14: 175-194 (1983).
- 35 PACANOWSKI, R., DIXON, K., ROSATI, A., The G.F.D.L Modular Ocean Model Users Guide, GFDL Ocean Group Technical Report No. 2, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA, Princeton University (1993).
- 36 PAETSCH, H., BOTZ, R., SCHOLTEN, J. C., STOFFERS P., Accumulation rates of surface sediments in the Norwegian-Greenland Sea. *Marine Geology*, 104: 19-30 (1991).
- 37 PFLAUMANN, U., HENSCH, H., Paleoceanography of the Norwegian and East Greenland Margins: Temperature transfer functions, In: *Nordatlantik 1993 Cruise No. 26*, edited by E. Suess, K. Kremling, J. Mienert, Leitstelle METEOR, Univ. Hamburg, 74-101 (1994).
- 38 PIEPENBURG, D., v. JUTERZENKA, K., Abundance, biomass, and small-scale dispersion patterns of brittle stars (Echinodermata: Ophiuroidea) on the Kolbeinsey-Ridge, north of Iceland. *Polar Biology*, 14: 185-194 (1994).
- 39 RITZRAU, W., GRAF, G., Increase of microbial biomass in the benthic turbidity zone of Kiel Bight after resuspension by a storm event. *Limnol. Oceanogr.*, 37: 1081-1086 (1992).

- 40 RITZRAU, W., Labor- und Felduntersuchungen zur heterotrophen Aktivität in der Bodennepheloidschicht. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 47: p. 99 (1994).
- 41 ROSELL, A., Long Chain Alcenone and Alcyl Alcenolate and Total Pigment Abundances as Climatic Proxy Indicators in the Northeastern Atlantic: Analytical Methods, Calibration and Stratigraphy. PhD Thesis University of Bristol. (1994)
- 42 SALIOT, A., Natural hydrocarbons in seawater. In Marine Organic Chemistry. Hrsg. DUURSMA, E. K., DAWSON, R., Elsevier, Amsterdam: 327-374 (1981).
- 43 SAMTLEBEN, C., SCHRÖDER, A., Coccolithophore communities in the Norwegian-Greenland Sea and their record in sediments. Mar Micropaleontol, 19: 333-354 (1992).
- 44 SAMTLEBEN, C., SCHRÖDER, A., Coccolithophoriden-Gemeinschaften und Coccolithen-Sedimentation im Europäischen Nordmeer. Zur Abbildung von Planktonzönosen im Sediment. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 25: p. 52 (1990).
- 45 SARNTHEIN, M., ALTENBACH, A., Late Quaternary changes in surface water and deepwater masses of the Nordic Seas and the northeastern North Atlantic - a review. Geologische Rundschau, 84: 89-107 (1995).
- 47 SARNTHEIN, M., WINN, K., JUNG, S., DUPLESSY, J.C., LABEYRIE, L., ERLKENKEUSER, H., GANSSEN, G., Changes in East Atlantic deepwater circulation over the last 30,000 years - An eight-time-slice record. Paleoceanography, 9: 209-267 (1994).
- 48 SCHÄFER, P., THIEDE, J., GERLACH, S., GRAF, G., ZEITZSCHEL, B., Global environmental change: the northern North Atlantic. Geol. Rundsch., 84: 3-10 (1995).
- 49 SCHÄFER-NETH, CHR., Modellierung der Paläoozeanographie des Nördlichen Nordatlantiks zur Letzten Maximalvereisung, Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 51: p. 106 (1994).
- 50 SCHRÖDER-RITZRAU, A., Aktuopaläontologische Untersuchungen zu Verbreitung und Vertikalfluß von Radiolarien sowie ihre räumliche und zeitliche Entwicklung im Jungquartär des Europäischen Nordmeeres. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 52: p. 99 (1994).
- 52 SCHULZ, H., Meeresoberflächentemperaturen im Nordatlantik und in der Norwegisch-Grönländischen See vor 9.000 Jahren. Auswirkungen des frühholozänen Insolationsmaximums. *Dissertation*, Universität Kiel, p. 119 (1994).
- 53 SHACKLETON, N. J., Attainment of Isotopic Equilibrium Between Ocean Water and the Benthonic Foraminifera *Uvigerina*: Isotopic Changes in the Ocean During the Last Glacial, Colloque CNRS n° 219, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris: 203-210 (1974).
- 54 STRUCK, U., Zur Paläo-Ökologie benthischer Foraminiferen im Europäischen Nordmeer während der letzten 600.000 Jahre. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, p. 38 (1992).
- 55 SÜNDERMANN, J., KLÖCKER, R., Sediment Transport Modelling with Applications to the North Sea, North Sea Dynamics, Hrsg. Sündermann, J., Lenz, W., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 453-471 (1983).
- 56 THOMSEN, C., Verfolgung pelagischer Prozesse mit Hilfe von biochemischen Komponenten am Beispiel der Alkenone (C37:2, C37:3). Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 43: p. 94 (1994).
- 57 THOMSEN, L., GRAF, G., MARTENS, V., STEEN, E., An instrument for sampling water from the bottom nepheloid layer. Cont. Shelf Sci., 14: 871-882 (1993).
- 58 THOMSEN, L., Untersuchungen zur Bodennepheloidschicht am westlichen Barents See Kontinental Hang. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 39: p. 96 (1992).
- 59 VOGELSSANG, E., Paläo-Ozeanographie des europäischen Nordmeeres an Hand stabiler Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 23 (1990).
- 60 WASSMANN, P., PEINERT, R., SMETACEK, V., Patterns of production and sedimentation in the boreal and polar Northeast Atlantic. Polar Research, 10: 209-228 (1991).
- 62 WEINELT, M., Veränderungen der Oberflächenzirkulation im Europäischen Nordmeer während der letzten 60.000 Jahre - Hinweise aus stabilen Isotopen. Ber. Sonderforschungsbereich 313, Univ. Kiel, 41: p. 106 (1993).

- 63 WOLD, C. N., Paleobathymetry and Sediment Accumulation in the Northern North Atlantic and Southern Greenland-Iceland-Norwegian Sea, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Kiel, p. 255 (1992).
- 64 ZANKE, U., Neuer Ansatz zur Berechnung des Transportbeginns von Sedimenten unter Strömungseinfluß. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, 46: 156-178 (1977).
- 65 ZANKE, U., Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport; Teil 1: Berechnung des Sedimenttransportes — allgemeiner Fall —. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, 47: 214-345 (1978).